

DISEÑO DE UN SISTEMA COMPACTO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA PARA
CONSUMO HUMANO EN LA GRANJA LA FORTALEZA UBICADA EN EL
MUNICIPIO DE MELGAR- TOLIMA

HAROLD ESTEBAN CORTÉS PINZÓN
LINA MARÍA MORA FAJARDO

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.

2015

DISEÑO DE UN SISTEMA COMPACTO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA PARA
CONSUMO HUMANO EN LA GRANJA LA FORTALEZA UBICADA EN EL
MUNICIPIO DE MELGAR- TOLIMA

HAROLD ESTEBAN CORTÉS PINZÓN
LINA MARÍA MORA FAJARDO

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director: Ing. M.I. Rafael Nikolay Agudelo Valencia

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.

2015

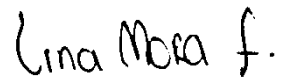
Declaratoria de originalidad:

“El presente proyecto de trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental de la Universidad Libre no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de calificación alguna, ni de título, o grado diferente o adicional al actual. El proyecto es resultado de las investigaciones del autor (es), excepto donde se indican las fuentes de Información consultadas”.



HAROLD ESTEBAN CORTÉS PINZÓN.

Código. 064101031



LINA MARÍA MORA FAJARDO.

Código. 064101008

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. Febrero 03 de 2015

DEDICATORIA

*Dedicamos este proyecto a
nuestro padres quienes nos han
apoyado incondicionalmente en
nuestras decisiones; son ellos, los
merecedores de esta gratitud.*

AGRADECIMIENTOS

Inicialmente queremos agradecer a Dios por darnos la vida y permitirnos culminar nuestra carrera profesional, a nuestros padres por ser el motor que nos impulsa día a día para salir adelante brindándonos confianza, amor y compañía en el cumplimiento de nuestras metas. Igualmente, queremos agradecer a nuestro director por brindarnos las herramientas, medios y conocimientos necesarios para el desarrollo del presente proyecto y nuestra formación como personas y profesionales. A ellos; debemos inmensamente el resultado final de este proyecto, pues fue su dedicación y compañía un aliado más en nuestros logros.

Finalmente, queremos agradecer a los propietarios de la Granja La Fortaleza quienes nos permitieron desarrollar nuestro proyecto de grado, facilitándonos el acceso a sus instalaciones; igualmente agradecemos a todos los docentes, quienes nos brindaron verdaderos conocimientos que nos servirán para afrontar nuestra vida como profesionales. A todos, gracias totales.

RESUMEN

El presente trabajo de grado contiene el diseño de un sistema compacto de potabilización de agua para la Granja La Fortaleza, ubicada en el municipio de Melgar – Tolima. El sistema se desarrolla en un solo módulo que integra los procesos de coagulación – floculación y sedimentación, seguido de los procesos de filtración y desinfección. Se dimensionó teniendo en cuenta los parámetros exigidos por el RAS 2000 Título C y la Resolución 2115 de 2007 respecto a la calidad del agua potable. Se realizaron ensayos de laboratorio con el fin de determinar algunos parámetros de diseño y garantizar la calidad del agua tratada. Los resultados obtenidos indican que el agua cruda extraída del pozo artesanal, es apta para potabilizar, igualmente, que la construcción del sistema compacto es viable en cuanto al volumen que ocupa y los costos de operación requeridos.

Palabras claves: Calidad del agua; Sistema compacto de potabilización.

ABSTRACT

This degree work contains the design of a compact water purification system for Granja La Fortaleza, located in the municipality of Melgar - Tolima. The system is developed in a single module integrating the processes of coagulation - flocculation and sedimentation, followed by filtration and disinfection processes. It was sized considering the parameters required by the RAS 2000 Title C and Resolution 2115 of 2007 regarding the quality of drinking water. Laboratory tests were conducted to determine some design parameters and ensure the quality of treated water. The results indicate that the raw water drawn from artesian well, is suitable for drinking, also, that the construction of compact system is feasible in terms of volume occupied and operating costs required.

Keywords: water quality; Compact water purification system.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	18
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. OBJETIVOS	21
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
4. ANTECEDENTES	22
5. MARCO REFERENCIAL.....	24
5.1 MARCO CONCEPTUAL.....	24
5.2 MARCO TEÓRICO	28
5.3 MARCO GEOGRÁFICO	57
5.4 MARCO LEGAL.....	59
6. DISEÑO METODOLÓGICO.....	63
7. RESULTADOS OBTENIDOS	69
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
8.1 CALIDAD DEL AGUA	73
8.2 DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO AMONIAICAL	84
8.3 ÍNDICE DE RIESGO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO (IRCA).....	85
8.4 ENSAYOS DE TRATABILIDAD PARA LA DETERMINACIÓN DEL COAGULANTE ADECUADO.....	87
8.5 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL COAGULANTE	88
8.6 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE DESINFECCIÓN.....	90
8.7 DATOS BÁSICOS Y DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA	92
8.8 COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA COMPACTO DISEÑADO	112
9. CONCLUSIONES.....	113
10. RECOMENDACIONES	115
11. BIBLIOGRAFÍA	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros y métodos de análisis de los Standard Methods	65
Tabla 2. Determinación del coagulante óptimo.	69
Tabla 3. Dosis óptima del coagulante encontrada en cada uno de los ensayos realizados.....	70
Tabla 4. Promedio de los cálculos de las características químicas	71
Tabla 5. Porcentaje de remoción de las características microbiológicas	71
Tabla 6. Puntaje de riesgo de cada parámetro medido.	85
Tabla 7. Clasificación del nivel de riesgo en salud según el IRCA por muestra y el IRCA mensual y las acciones que deben adelantarse.....	86
Tabla 8. Características de las bombas dosificadoras.....	96
Tabla 9. Especificaciones técnicas de la planta compacta	96
Tabla 10. Característica de la bomba de succión	98
Tabla 11. Equipo de mezcla rápida (coagulación)	102
Tabla 12. Equipo de mezcla lenta (floculador)	103
Tabla 13. Sedimentador de alta tasa de flujo laminar	104
Tabla 14. Sistema de filtración (filtros rápidos)	105
Tabla 15. Costo total de construcción del sistema	112
Tabla 16. Selección del coagulante adecuado.....	124
Tabla 17. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 0	125
Tabla 18. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 1	126
Tabla 19. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 2	126
Tabla 20. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 3	127
Tabla 21. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 4	127
Tabla 22. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 5	128
Tabla 23. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 6	128
Tabla 24. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 7	129
Tabla 25. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 8	129
Tabla 26. Determinación de Alcalinidad Total: Método Titulación HCl.....	130
Tabla 27. Determinación de Acidez: Método Titulación NaOH.....	131
Tabla 28. Cantidad de Sulfatos presentes en el agua: Método Espectrofotometría	132
Tabla 29. Cantidad de Nitritos presentes en el agua: Método Espectrofotometría	133
Tabla 30. Cantidad de Nitratos presentes en el agua: Método Espectrofotometría	135

Tabla 31. Determinación de cloruros	136
Tabla 32. Cantidad de Cadmio presente en el agua: Método Espectrofotometría	137
Tabla 33. Cantidad de Plomo presente en el agua: Método Espectrofotometría .	138
Tabla 34. Cantidad de Calcio presente en el agua: Método Espectrofotometría .	139
Tabla 35. Cantidad de Hierro presente en el agua: Método Espectrofotometría .	140
Tabla 36. Cantidad de Magnesio presente en el agua: Método Espectrofotometría	141
Tabla 37. Cantidad de Zinc presente en el agua: Método Espectrofotometría	142
Tabla 38. Escherichia coli en las muestras de agua	143
Tabla 39. Cantidad de Nitrógeno Amoniacal presente en el agua: Método Titulación con HCl.....	144
Tabla 40. Cálculo del IRCA.....	150
Tabla 41. Determinación Punto de Quiebre del Cloro.....	154
Tabla 42. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 1	155
Tabla 43. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 2	156
Tabla 44. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 3	157
Tabla 45. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 4	158
Tabla 46. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 5	159
Tabla 47. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 6	160
Tabla 48. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 7	161
Tabla 49. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 8	162
Tabla 50. Coeficiente de consumo máximo diario, k_1	164
Tabla 51. Datos iniciales para el diseño del sistema de potabilización	165
Tabla 52. Datos iniciales para el diseño del sistema de bombeo.....	166
Tabla 53. Pérdidas en la impulsión	169
Tabla 54. Pérdidas en la succión	170
Tabla 55. Cálculo de la altura dinámica	173
Tabla 56. Curva característica de la bomba.....	175
Tabla 57. Curva de operación del sistema.....	175
Tabla 58. Cálculo de la potencia de la bomba	177
Tabla 59. Determinación del caudal de dosificación de PAC.....	179
Tabla 60. Diseño del hidrociclón	180
Tabla 61. Diseño del coagulador helicoidal.....	186
Tabla 62. Diseño del floculador helicoidal.....	192
Tabla 63. Cálculo de la apotema	196
Tabla 64. Diseño del sedimentador de alta tasa	198
Tabla 65. Diseño del cono truncado para la recolección de lodos	200
Tabla 66. Valores aproximados de factores de forma para arena	202

Tabla 67. Determinación del Número de Reynolds, Coeficiente de arrastre y relación de peso de las partículas con respecto al diámetro.....	203
Tabla 68. Características de los Filtros rápidos	208
Tabla 69. Cálculos del diseño de los Filtros rápidos	208
Tabla 70. Datos requeridos para la hidráulica de lavado de los filtros	209
Tabla 71. Pérdidas totales en el lavado de los filtros	209
Tabla 72. Diseño de la canaleta de lavado	209
Tabla 73. Caudal de dosificación de NaClO	210

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Resultados de turbiedad en los ensayos de laboratorio realizados	74
Grafica 2. Resultados de nitritos en los ensayos de laboratorio realizados	75
Grafica 3. Resultados de nitratos en los ensayos de laboratorio realizados	76
Grafica 4. Resultados de alcalinidad en los ensayos de laboratorio realizados	78
Grafica 5. Resultados de acidez en los ensayos de laboratorio realizados	79
Grafica 6. Resultados de cloruros en los ensayos de laboratorio realizados	80
Grafica 7. Resultados de dureza total en los ensayos de laboratorio realizados ..	81
Grafica 8. Resultados de sulfatos en los ensayos de laboratorio realizados	82
Grafica 9. Resultados de Coliformes fecales en los ensayos de laboratorio realizados.....	83
Grafica 10. Resultados de la determinación del coagulante óptimo en los ensayos de laboratorio realizad	87
Grafica 11. Determinación del Punto de Quiebre para la muestra de agua N°1	91
Grafica 12. Curva característica de la bomba y operación del sistema	176

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de coagulantes	35
Cuadro 2. Modelos del proceso de clarificación por sedimentación	43

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Coagulación por barrido	38
Imagen 2. Uso de la prueba de Jarras para definir dosis óptima de insumos químicos.....	39
Imagen 3. Curva de demanda de cloro	53
Imagen 4. Ubicación de la vereda Ceboruco en el municipio de Melgar	57
Imagen 5. Ubicación de Melgar en el Departamento del Tolima.....	58
Imagen 6. Método para la toma de muestras de aguas subterráneas	64
Imagen 7. Diagrama Metodológico	68
Imagen 8. Plano del diseño del sistema compacto de potabilización	107
Imagen 10. Medición de pH en el laboratorio.....	145
Imagen 11. Medición de cloruros en el laboratorio	145
Imagen 12. Medición de nitrógeno amoniacal en el laboratorio	146
Imagen 13. Medición de dureza en el laboratorio	146
Imagen 14. Medición de acidez y alcalinidad en el laboratorio	147
Imagen 15. Ensayo de jarras realizado en el laboratorio agua tratada - Muestra 8	147
Imagen 16. Ensayo de jarras realizado en el laboratorio agua tratada – Muestra 5	148
Imagen 17. Ensayo de jarras realizado en el laboratorio agua cruda	148
Imagen 18. Floc formado a partir del ensayo de jarras realizado en el laboratorio - Muestra 4	148
Imagen 19. Floc formado a partir del ensayo de jarras realizado en el laboratorio - Muestra 2	149
Imagen 20. Bomba comercial seleccionada.....	174

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ENSAYO DE JARRAS – DETERMINACIÓN DEL COAGULANTE....	123
ANEXO B. ENSAYO DE JARRAS	125
ANEXO C. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO	130
ANEXO D. DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO AMONIAICAL	144
ANEXO E. REGISTRO FOTOGRÁFICO	145
ANEXO F. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO (IRCA)	150
ANEXO G. FICHA TÉCNICA DEL POLICLORURO DE ALUMINIO GRANULAR 152	
ANEXO H. FICHA TÉCNICA DEL HIPOCLORITO DE SODIO	153
ANEXO I. DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE DESINFECCIÓN	154
ANEXO J. MEMORIA DE CÁLCULO.....	163

INTRODUCCIÓN

El agua, elemento esencial para la vida de todos los seres demanda un consumo creciente en relación con la población. Sin un agua potable segura, las personas, sin tener en cuenta los animales y las plantas, no podrían sobrevivir. Esta, se encuentra relacionada directamente con el desarrollo social a través de su influencia sobre la salud. Los trastornos generados con la contaminación del agua son las causas más comunes de enfermedades y muertes, afectando principalmente a las personas que viven en países en desarrollo (Unesco, 2005). Lo que quiere decir, que todas las medidas destinadas a mejorar la calidad del agua de consumo generan beneficios tangibles para la salud. Los sistemas compactos para la purificación de agua se hacen indispensables para aquellas comunidades rurales que no cuentan con un sistema de abastecimiento de agua potable. En la vereda Ceboruco, área rural del municipio de Melgar – Tolima, se encuentra la Granja La Fortaleza, la cual no cuenta con un sistema de abastecimiento de agua potable, lo que ocasiona en las personas que allí residen afectaciones a la salud. Por tener un área delimitada significativamente pequeña, un sistema de tipo compacto es una solución viable para satisfacer la demanda del recurso en la Granja.

Los sistemas compactos, al igual que una planta convencional, cuentan con las fases de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

El presente proyecto se enfoca en el diseño de un sistema compacto de potabilización que garantice a los habitantes de la Granja La Fortaleza cobertura y calidad con relación al agua tratada; para ello, fue necesario realizar ensayos de laboratorio que permitieron conocer el estado actual del agua cruda y a partir de ello determinar las dosificaciones y tiempos óptimos requeridos para los procesos de coagulación y desinfección y así mantener un adecuado funcionamiento de la planta.

Este proyecto sirve como referencia para estudios de potabilización y diseños de plantas en aquellas comunidades rurales que no cuentan con un sistema de abastecimiento de agua y mucho menos con el suministro de agua potable.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El agua es una fuente importante para la supervivencia en este planeta. Por ello, su conservación y distribución es una prioridad a medida que aumenta la demanda poblacional (Ambashtaa & Sillanpaa, 2010); en el ámbito mundial, la cobertura de agua potable para consumo humano fue del 81% para el año 2012 en zonas rurales, en América Latina y el Caribe esta misma cobertura correspondía al 63%, así mismo, en Colombia el 72% de la población total, ubicada en zonas rurales contaba con acceso a agua potable (OMS & UNICEF, 2013). Para el caso de Melgar – Tolima, solo el 82,9 % de la población total, asentada en zona urbana y rural contaba con un sistema de acueducto. Actualmente, la zona rural del municipio está dividida en 26 veredas, de las cuales 21 de estas tienen un sistema de abastecimiento de agua por acueductos veredales (Gómez & Arias, 2012). En la Vereda Ceboruco, donde se encuentra ubicada la Granja la Fortaleza con un área de 4 hectáreas y una población flotante de 155 personas (Información Turística de la Granja) , no se cuenta con un acueducto que suministre agua potable a la población (Gómez, 2012).

Al no contar con este servicio, los habitantes de la Granja se han visto en la obligación de abastecerse por un sistema de carro tanque para suplir varias de sus necesidades, excepto para su consumo, ya que para ello deben adquirir el agua de una entidad certificada. No obstante; los altos costos de adquisición de agua potable, han obligado en muchos de los casos a los habitantes de la granja a consumir el agua suministrada por carro tanque, causando en algunas ocasiones problemas de salud, como lo evidencia la comunidad. Dentro de estas enfermedades asociadas a la mala calidad del agua, se evidenció en el municipio, en su orden de importancia, la infección respiratoria aguda (IRA), la enfermedad diarreica aguda (EDA) y el dengue, causando la IRA y la EDA un mayor impacto en los niños menores de 5 años (Gómez & Arias, 2012); adicionalmente, la necesidad

por adquirir el recurso genera una dependencia por parte de la granja en la compra del agua hacia las entidades autorizadas; incrementando así, los costos con el fin de obtener una mejor calidad de vida y sostener sus actividades económicas dentro de las cuales, se destaca la crianza de gallinas, caballos y peces, así, como sus actividades turísticas en donde se ofrecen servicios de alojamiento, zona de campamento, pesca y piscina.

Es así, como el diseño de un sistema compacto de potabilización de agua podría solucionar la problemática a la cual está sometida la Granja actualmente; evaluando la calidad del agua de la Fuente Hídrica de la zona de estudio y proponiendo las dosificaciones de insumos químicos óptimas en cada proceso se garantizaran las condiciones de salubridad mínimas requeridas para potabilización del recurso (Arboleda, 2000); disminuyendo así, las enfermedades mencionadas anteriormente y elevando la calidad de vida de los habitantes y visitantes de la Granja La Fortaleza.

2. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo del presente proyecto dará como resultado el diseño de un sistema compacto de potabilización de agua que al implementarse les permitirá a los habitantes y visitantes de la Granja La Fortaleza acceder a un sistema de agua potable totalmente confiable y seguro, disminuyendo así los riesgos de adquirir enfermedades causadas por la calidad del agua, como la EDA (enfermedad diarreica aguda) evidenciada en el municipio de Melgar - Tolima (Gómez & Arias, 2012) que puede estar asociada a parásitos presentes en el agua como lo es la microsporidia (Izquierdo, et al, 2011); además, se garantizará el cubrimiento de la demanda del recurso dentro de la granja (Díaz, et al, 2000).

El diseño de un sistema compacto de potabilización reducirá espacio en cuanto a infraestructura, garantizará un rendimiento durante las 24 horas del día (Espinoza & Martínez, 2011) y además disminuirá los costos de producción y operación de la misma (Estrada, 2011), generando así un ahorro significativo para los propietarios de la granja.

Esta investigación puede ser de gran interés para todos los habitantes de la Granja La Fortaleza, la comunidad de la vereda Ceboruco, distintas comunidades o granjas asentadas en zonas rurales que no cuenten con suministro de agua potable, la Universidad Libre (Facultad de Ingeniería), la Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima) y la Alcaldía local de Melgar – Tolima, debido a que algunas de las veredas del municipio aún no tienen acceso a agua potable y la calidad del agua suministrada en el municipio no cuenta con los requisitos básicos para el consumo humano (Gómez & Arias, 2012).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema compacto de potabilización de agua para consumo humano en la Granja la Fortaleza ubicada en el municipio de Melgar- Tolima.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la calidad del agua de la Fuente Hídrica existente en la zona de estudio, teniendo en cuenta las características físicas, químicas y microbiológicas de acuerdo a los parámetros admisibles para agua potable según Resolución 2115 de 2007.
- Determinar las dosificaciones de insumos químicos para los procesos de coagulación, floculación y desinfección, necesarias en el sistema compacto de potabilización de agua.
- Dimensionar el sistema compacto de potabilización de agua.

4. ANTECEDENTES

La falta de agua en algunas regiones del mundo, ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías que permiten de una manera satisfactoria brindar un agua totalmente confiable. Los sistemas compactos de potabilización se han convertido en una solución viable a los problemas ambientales relacionados con el recurso hídrico. Tanto así, que alrededor del mundo se adelantan investigaciones para la implementación de dichos sistemas en proyectos, pequeñas comunidades y zonas rurales que actualmente no tienen acceso a agua potable o simplemente cuentan con un servicio que no garantiza la calidad del agua tratada.

En el año 2011 en Guayaquil, Ecuador, se adelantó un proyecto cuya finalidad era diseñar un sistema compacto de potabilización de agua para usarla en caso de la ocurrencia de una emergencia natural, como desastres. Para ello, propusieron que la planta fuera autosuficiente en términos energéticos y de fácil transporte. El parámetro más importante para el diseño fue el sedimentador, el cual constaba de paneles inclinados, lo que reducía su espacio en un 90% y cuya eficiencia no se veía afectada con el aumento de la carga superficial y la turbidez del agua (Torres, 2011).

En el departamento de Caaguazú, en Paraguay, debido a las diversas problemáticas que afrontaba la comunidad, en cuanto a las enfermedades producidas por no contar con un sistema de abastecimiento de agua potable se diseñó una microplanta potabilizadora, capaz de suministrar agua para 250 personas. Para dar garantías en términos monetarios se desarrolló un estudio de factibilidad cuyo resultado no sobrepasó las recomendaciones de los organismos internacionales, respecto a los gastos producidos por área (Levy & Mongelós, 2004).

En México, así como en muchos otros países existe una tendencia a no consumir el agua de la llave de forma directa, debido a la poca confianza en cuanto a su calidad.

Es por ello, que se evaluó la alternativa de incorporar un sistema compacto de potabilización de agua para casas o pequeños comercios que garantizara la calidad del recurso a un caudal de 50 L/hora (González, et al, 2002).

En Colombia, el suministro de agua con características aptas para el consumo humano se ha convertido en un problema que afecta principalmente a las zonas rurales. En el municipio de sabana de torres de Santander, se realizó un estudio de factibilidad que permitiera establecer la mejor alternativa para la adquisición de una planta compacta prefabricada para una finca en donde no se cuenta con el suministro de agua potable. En la investigación, fue necesario evaluar las características fisicoquímicas de la microcuenca ubicada en el área de estudio y poder así, determinar cuál era el tipo de planta comercial que más se adaptaba a las necesidades de la finca (Maldonado & Nova, 2012).

Por otro lado, en la ciudad de Medellín, se diseñó un sistema compacto de potabilización para abastecer agua a pequeñas comunidades que actualmente no cuentan con este servicio (Fernández, 2009).

Actualmente, existen empresas que ofrecen plantas compactas de purificación de agua prefabricadas, cuya principal desventaja es que son fabricadas de forma universal y no se adaptan a las características independientes del recurso hídrico estudiado para cada zona y a la demanda de consumo de agua requerido.

Se toman dichos estudios como antecedentes, puesto que brindan información esencial con relación al área de investigación del proyecto; en lo que se refiere a las características, análisis y parámetros que se deben tener en cuenta en el diseño de sistemas compactos de potabilización.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO CONCEPTUAL

Acidez. Capacidad del agua para neutralizar bases, capacidad para reaccionar con iones hidróxido, capacidad para ceder protones o la medida de su contenido total de sustancias acidas. Se considera que todas las aguas que tienen un pH inferior a 8,5 unidades tienen acidez (Rice, et al, 2012).

Agua cruda. Agua que se encuentra en el ambiente (lluvia, superficial, subterránea, océanos, etc.) que no ha sido sometida a ningún tipo de tratamiento ni modificación en su estado natural (Sierra, 2011).

Agua potable. Agua a la cual se le han variado o alterado sus características físicas, químicas, biológicas y organolépticas, cumpliendo con las condiciones señaladas en la Resolución 2115 de 2007 para el consumo humano sin que se produzcan efectos adversos a la salud (Sierra, 2011).

Alcalinidad. Capacidad del agua para neutralizar ácidos. Esta capacidad se origina en el contenido de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos y ocasionalmente silicatos y fosfatos. Es expresada en miligramos por litro de equivalente de carbonato de calcio (CaCO_3) (Viessman, et al, 2009).

Análisis físico del agua. Pruebas realizadas en el laboratorio a fin de conocer las características físicas de una muestra de agua; los parámetros físicos analizados son turbiedad, color, temperatura, sólidos y conductividad (RAS 2000 Título C).

Análisis microbiológico del agua. Pruebas realizadas en el laboratorio con el fin de determinar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos de una muestra de agua como la de Coliformes fecales (RAS 2000 Título C).

Análisis químico del agua. Pruebas realizadas en el laboratorio a fin de conocer las características químicas de una muestra de agua; los parámetros químicos analizados son alcalinidad, acidez, dureza total, nitrógeno amoniacal, cloruros, DQO, calcio y magnesio (Hammer, 2012).

Calidad del agua. Es el resultado de comparar las características físicas, químicas, biológicas y organolépticas del agua. Un valor acercado a calidad del agua puede referirse a una lista de concentraciones y especificaciones que al momento de ser consumida no genere riesgos en la salud humana (OMS, 2006).

Cloruros. El ion cloruro es una de las especies de cloro de importancia en el agua, las principales formas de cloro en el agua son; ácido clorhídrico (HCl), ion cloruro (Cl⁻), cloro molecular (Cl₂), ácido hipocloroso (HOCl), ion hipoclorito (OCl⁻) y ácido cloroso (HClO₂) (Romero, 2005).

Coagulante. Sustancia química que inducen el aglutinamiento de las partículas muy finas, ocasionando la formación de partículas más grandes y pesadas (RAS 2000 Título C).

Coloides. Partículas en suspensión finamente divididas (que no disuelven) que permanecen dispersos en un líquido por largo tiempo debido a su menor diámetro y a la presencia de una carga eléctrica en su superficie (Rodier, et al, 2009). Los coloides se pueden dividir en hidrofóbicos, odiosos del agua, e hidrofílicos, amantes del agua. Estos últimos, tienen la habilidad de reaccionar espontáneamente con el agua para formar suspensiones coloidales, las cuales pueden ser deshidratadas y convertidas en el material original; por ello, se denominan coloides reversibles. Los coloides hidrofobicos, no se dispersan espontáneamente el agua y se obtienen por medios físicos y químicos, denominándoles así coloides irreversibles (Romero, 2005).

Desinfección. Proceso físico o químico en el cual son eliminados o destruidos los organismos patógenos presentes en el agua (RAS 2000 Título C).

Es una operación de importancia incuestionable para el suministro de agua potable, pues, constituye una barrera eficaz para numerosos patógenos (especialmente las bacterias) durante el tratamiento del agua de consumo y debe utilizarse tanto en aguas superficiales como en aguas subterráneas expuestas a la contaminación fecal (OMS, 2006).

Dosificación. Acción mediante la cual es suministrada una sustancia química al agua (RAS 2000 Título C).

Dureza. Corresponde a la suma de las concentraciones de cationes metálicos a excepción de las de los metales alcalinos y del ion hidrogeno. La dureza se expresa en miligramos por litro de equivalente de carbonato de calcio (CaCO_3) (Rodier, et al, 2009).

Escherichia Coli (E -Coli). Bacilo aerobio Gram -negativo que no produce esporas, pertenece a la familia de los enterobacteriaceas. Se clasifica como aerobia o anaerobia facultativa. Se desarrolla a 44 ± 0.5 °C en medios complejos, fermenta la lactosa liberando ácido y gas en un plazo de 24 a 48 horas. Es un indicador de contaminación microbiológica del agua para consumo humano (RAS 2000 Título C).

Gradiente de velocidad medio. Raíz cuadrada de la potencia total disipada (P) en la unidad de volumen de una estructura hidráulica (V) dividida por la viscosidad absoluta del agua (μ) (RAS 2000 Título C).

Nitrógeno amoniacal. Los compuestos nitrógeno son muy importantes en los procesos vitales de todas las plantas y animales, la química del nitrógeno es compleja a causa de los diversos estados de valencia que puede asumir este elemento y al hecho de que los cambios en la valencia los pueden hacer organismos

vivos, se considera nitrógeno amoniacal a todo el nitrógeno que existe como ion amonio o en equilibrio (Romero, 2005).

Olor y sabor. Los olores y sabores en el agua están íntimamente ligados; Estos se deben, a la presencia de materia orgánica, sulfato de sodio y magnesio, diferentes tipos de algas, hongos, plancton, entre otros (Romero, 2005).

Sólidos disueltos. Se calculan pasando la muestra de agua por un papel de filtro y luego determinando los sólidos totales del filtrado (Romero, 2005).

Sólidos sedimentables. Sólidos en suspensión que se sedimentan, en condiciones tranquilas, por efecto de la gravedad (Romero, 2005).

Sólidos suspendidos. Pequeñas partículas de sólido dispersas en el agua; no disueltas (Romero, 2005).

Temperatura del agua. Determinar la temperatura es importante para diferentes procesos de tratamiento de agua (coagulación, sedimentación, etc.) y análisis de laboratorio, ya que puede afectar la viscosidad y la velocidad de las reacciones químicas (Sierra, 2011).

Tratamiento. Conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda, con el fin de modificar sus características físicas, químicas, microbiológicas y organolépticas, para que sea potable de acuerdo a las normas establecidas en la Resolución 2115 de 2007 (RAS 2000 Título C).

Turbiedad. Es una expresión de la propiedad óptica causada por la dispersión e interferencia de rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua, debido a partículas insolubles del suelo (Arcilla, Limo, etc.), materia orgánica e inorgánica, plancton y otros microorganismos. En el agua, la turbiedad se ve afectada por la presencia de coloides (Rice, et al, 2012).

5.2 MARCO TEÓRICO

Agua

El agua, elemento compuesto por dos moléculas de hidrogeno y una oxígeno. Componente de la biosfera que se encuentra en la naturaleza en grandes cantidades, en estado líquido, sólido y gaseoso. Su palabra proviene del latín *aqua*, y es el líquido de la vida. Por tanto, se considera un elemento esencial para la existencia de todos los seres vivos y para el bienestar del medio ambiente, en donde estos desarrollan sus actividades sociales y productivas; lo cual, impacta directa o indirectamente las fuentes proveedoras de agua (IDEAM, 2007). El hombre, a través del tiempo le ha dado diferentes usos al agua, dentro de los cuales se destaca la agricultura y la industria; actualmente, este uso corresponde a un 70% y un 20 % del total de agua dulce respectivamente. Por ende, se puede deducir, que el 10 % restante es utilizado directamente por el hombre para beber, lavarse, entre otros (González, 2012).

Fuentes de agua

El agua circula continuamente en la tierra a través del ciclo hidrológico de precipitación o lluvia, infiltración, escurrimiento, almacenamiento, evaporación, re precipitación y así sucesivamente. Una fuente proveedora de agua es aquella en la cual el agua es desviada en un punto de su ciclo natural para ser usada temporalmente y luego ser regresada o no a su origen.

Estas fuentes pueden ser, entre otras, superficiales y subterráneas; **las aguas superficiales**, de pequeños manantiales o terrenos elevados, proporcionan aguas insípidas y prácticamente claras, exceptuando en la época de lluvias, ya que debido a esto pueden contener gran cantidad de sólidos suspendidos. Estas aguas, pueden verse afectadas por bacterias de origen animal y se encuentran siempre expuestas

a la contaminación, accidental o incidental, de origen antropogénico (Hilleboe, 2001).

Las aguas subterráneas, son aquellas cuyo origen puede ser debido a la infiltración del agua en el suelo, el agua condensada en el suelo y el agua surgente desde el interior de la tierra (Prieto, 2004). Una desventaja de los abastecimientos subterráneos, radica en la tendencia de proporcionar aguas extremadamente duras, lo cual es debido a que los constituyentes que causan la dureza son lavados de los depósitos minerales. Otra desventaja, puede deberse al uso de plaguicidas para prevenir la acción de parásitos agrícolas en las zonas rurales, los cuales no solo afectan la salud humana si no también dependiendo de ciertos factores, como, la naturaleza del suelo y la climatología, pueden llegar a afectar las aguas subterráneas (López, et al, 1992).

Más del 90 % del agua dulce existente se encuentra bajo la superficie terrestre, por tanto, se considera un factor importante para el estudio del aprovechamiento de las aguas subterráneas.

Adicional a esto, las aguas subterráneas presentan otras ventajas frente a la explotación de las aguas superficiales; pues, ocasionan menos pérdidas por evaporación, se encuentran menos expuestas a la contaminación, se ven afectadas en menor grado por los cambios climáticos y su temperatura permanece casi siempre constante, debido a que está contenida dentro del subsuelo donde no se aprecian variaciones importantes de temperatura (Torres, 2006).

Plantas de potabilización

La calidad el agua cruda varía dependiendo del medio natural en el cual se encuentre; de acuerdo a esto, se puede hacer más complejo o no el tipo de tratamiento requerido para producir agua potable.

Aunque no existe una norma para determinar el tipo de planta requerida para tratar un agua, si se deben realizar unos estudios que permitan conocer cuáles son las condiciones actuales de la fuente hídrica (donde va a ser extraída el agua) y así mismo mediante una serie de procesos y operaciones formular y dimensionar un sistema de potabilización de agua. Dichos procesos son: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (Romero, 2006).

Entonces, una planta de potabilización de agua no es más que un conjunto de estructuras o una serie de procesos eficientes por los cuales el agua es tratada durante un periodo de tiempo, de manera que al final se obtenga un agua totalmente pura sin ningún tipo de microorganismo que pueda ser el causante de enfermedades hídricas, cumpliendo con los parámetros establecidos en la Resolución 2115 de 2007.

El objetivo primordial del diseño de una planta potabilizadora debe ser, integrar de una forma económica, los procesos y operaciones requeridas, para que así, se pueda satisfacer los requerimientos de demanda, calidad de agua potable y mejorar la calidad de vida de las personas; para ello, es necesario que la planta sea en su gran medida flexible y de máxima confiabilidad, puesto que una flexibilidad, asegura una producción normal, en el caso que una unidad de la planta este fuera de servicio.

Coagulación

El agua en su forma molecular pura no existe, por tanto en su estado natural puede contener variedad de impurezas, solubles o insolubles. Dentro de estas impurezas se encuentran tres tipos de sólidos: suspendidos, disueltos y coloidales, que son considerados no sedimentables. Los sólidos suspendidos son transportados debido a la acción de arrastre y movimiento del agua; los más pequeños menores de 0,01 mm no se sedimentan rápidamente. Los sólidos disueltos, materia orgánica e inorgánica, son invisibles por separado y generalmente son los causantes de diferentes problemas de olor, sabor, color y enfermedades; estos son removidos

mediante métodos físicos y químicos y juegan un papel importante en la aceptabilidad del agua por parte de quien la consume.

Los sólidos coloidales consisten en limo fino, bacterias, partículas causantes de color, virus, entre otros, los cuales sedimentan después de varios periodos, su efecto se puede observar en el color y turbiedad del agua. Estas impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que permanezcan en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua, a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración (Romero, 2005).

Mediante el proceso de coagulación, es posible eliminar o remover estas impurezas que contiene el agua; este, es un proceso utilizado para causar la agregación del material suspendido no sedimentable y destrucción de la estabilidad de los coloides del agua, es decir, que mediante la adición de sustancias químicas al agua (coagulantes) y una distribución uniforme en ella, las partículas se aglutinan con un peso específico superior al del agua denominadas floc.

En la coagulación se remueve turbiedad, color (verdadero y aparente), bacterias, virus, algas y otros organismos planctónicos, fosfatos y sustancias productoras de olores y sabores, derivadas generalmente de compuestos orgánicos (Arboleda, 2000).

La coagulación se puede realizar mediante coaguladores mecánicos e hidráulicos; uno de los principales parámetros del diseño son el gradiente de mezcla y el tiempo de mezcla.

En los coaguladores mecánicos, el gradiente de mezcla se calcula mediante:

$$G = \sqrt{\frac{p}{\mu v}}$$

$$P = K\rho N^3 d^5$$

Donde:

G = Gradiente de mezcla

P = potencia en W

V = volumen

K = constante

ρ = densidad <kg/m³>

N = Velocidad del impulsor <rps>

d = diámetro del impulsor <m>

μ = viscosidad dinámica del agua

Y el tiempo de mezcla está dado por:

$$t = \frac{5,9 \times 10^6}{C^{1,49} G}$$

Donde:

t = tiempo de mezcla

C = dosis del coagulante <mg /L>

En los coaguladores hidráulicos, el gradiente de mezcla se calcula mediante:

$$G = \sqrt{\frac{\rho Q h l}{\mu v}}$$

Donde:

G = Gradiente de mezcla

Q = caudal

V = volumen

ρ = densidad <kg/m³>

h = altura de la lámina

μ = viscosidad dinámica del agua

Y el tiempo de mezcla:

$$t = \frac{2 L}{V_1 + V_2}$$

Donde:

t = tiempo de mezcla

V = velocidad

L = longitud

Coagulantes

Los coagulantes más empleados son los derivados de aluminio y de hierro, la cal, y diversos polímeros. Los derivados de aluminio y/o de hierro, se hidrolizan rápidamente formando precipitados insolubles. Pero el alumbre (sulfato de aluminio) incrementa los sulfatos en el agua y forma flóculos difíciles de sedimentar, mientras que el hierro aumenta la concentración de cloruros en el agua y causa problemas a pH ácidos. La cal, forma un floc muy denso y fácilmente sedimentable pero es difícil de manipular.

Entre los derivados del aluminio el más utilizado es el sulfato de aluminio, y está entrando en el mercado el policloruro de aluminio (PAC), compitiendo en rentabilidad con los otros compuestos por su mayor eficiencia y menor formación de lodos.

Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)

El sulfato de aluminio, es el químico más usado en el proceso de coagulación. Es un sólido cristalino grisáceo que contiene aproximadamente 17 % en masa de alúmina (Al_2O_3), soluble en agua. La solución es un líquido translúcido, se recomienda no utilizar disoluciones con concentraciones mayores a 8% de Al_2O_3 en masa a temperaturas cercanas a 0 °C, para evitar la sedimentación.

Policloruro de aluminio (PAC)

El policloruro de aluminio es un coagulador de uso para el tratamiento de agua. Este es un coagulante de aluminio prepolimerizado, que no deben confundirse con los polímeros ya que no pueden ser descritos con una sola fórmula química debido a que consisten de una serie de compuestos con propiedades diferentes que aseguran un buen rendimiento en diversas aplicaciones y condiciones de operación.

Los PAC pueden ser representados por diferentes fórmulas empíricas entre las que está la siguiente fórmula general:



El grado de neutralización puede ser expresado mediante la basicidad que es el número de radicales oxhidrilos (OH). A mayor cantidad de OH⁻ mayor es la basicidad, lo que implica mayor carga positiva al formar cadenas largas y complejas de aluminio; esto puede ser expresado por: (CONAGUA, 2007).

$$\% \text{ Basicidad} = 100 (\text{OH}) / 3 (\text{Al})$$

En el cuadro 1 se observa los tipos de coagulantes más usados.

Cuadro 1. Tipos de coagulantes

Reactivo	Fórmula	Presentación	Uso	Dosis usual (g/m ³)	Empleo
Sulfato de aluminio	$(\text{SO}_4)_3 \text{Al}_2$	Sólida o líquida	Coagulante	10 - 150 (1)	Muy frecuente
Sulfato de aluminio + cal	$(\text{SO}_4)_3 \text{Al}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$	Líquida	Ablandamiento	33 % de (1) + (cal)	Frecuente
Sulfato de aluminio + sosa cáustica	$(\text{SO}_4)_3 \text{Al}_2 + \text{NaOH}$	Sólida o líquida	Ablandamiento	36 % de (1) + (sosa)	Frecuente
Sulfato de aluminio + carbonato sódico	$(\text{SO}_4)_3 \text{Al}_2 + \text{CO}_3\text{Na}_2$	Sólida	Ablandamiento	50 - 100 % de (1) + (carbonato)	Poco frecuente
Aluminato sódico	AlO_2Na	Sólida o líquida	Coagulante	5 - 50	Poco frecuente
Polímeros de aluminio	Varias	Líquida	Coagulante		Poco frecuente
Cloruro de aluminio	$\text{Cl}_3 \text{Al}$	Líquida	Coagulante		Muy raras veces
Cloruro férrico	$\text{Cl}_3 \text{Fe}$	Sólida o líquida	Coagulante	5 - 150 (4)	Frecuente
Cloruro férrico + cal	$\text{Cl}_3 \text{Fe} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	Líquida	Ablandamiento		Frecuente
Sulfato férrico	$(\text{SO}_4)_3 \text{Fe}_2$	Sólida	Coagulante	10 - 150 (2)	Ocasional
Sulfato férrico + cal	$(\text{SO}_4)_3 \text{Fe}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$	Líquida	Ablandamiento	40 % de (2) + (cal)	Ocasional
Sulfato ferroso	$\text{SO}_4 \text{Fe}$	Sólida	Coagulante	10 - 100 (3)	Ocasional
Sulfato ferroso + cloro	$\text{SO}_4 \text{Fe} + \text{Cl}_2$	Sólida y gaseosa	Ablandamiento y desinfección	12 % de (3) + (cloro)	Frecuente
Sulfato ferroso + cal	$\text{SO}_4 \text{Fe} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	Líquida	Ablandamiento	26 % de (3) + (cal)	Frecuente
Cloruro férrico + aluminato sódico	$\text{Cl}_3 \text{Fe} + \text{AlO}_2\text{Na}$	Líquida	Coagulante	100 % de (4)	Poco frecuente
Sulfato cúprico	$\text{SO}_4 \text{Cu}$	Sólida o líquida	Coagulante	5 - 20 (5)	Muy raras veces
Sulfato cúprico + cal	$\text{SO}_4 \text{Cu} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	Líquida	Coagulante	30 % de (5) + (cal)	Muy raras veces
Ozono	O_3	Gaseosa	Coadyuvante y desinfección		Ocasional

Fuente: Arboleda, 2000.

Mecanismos de coagulación

Las partículas coloidales, las sustancias húmicas y algunos microorganismos presentan una carga negativa en el agua, lo cual impide la aproximación de las mismas. En el tratamiento del agua será necesario alterar esta fuerza iónica mediante la adición de sales de aluminio o de hierro o de polímeros sintéticos que provoquen el fenómeno de la coagulación.

Actualmente se considera la coagulación como el resultado de la acción de cuatro mecanismos: Compresión de capa difusa; Adsorción y neutralización; Barrido; Adsorción y formación del puente.

- Coagulación por compresión de la doble capa. Este modelo explica el fenómeno de la desestabilización de un coloide por medio de un coagulante. La introducción de un electrolito indiferente en un sistema coloidal causa un incremento de la densidad de cargas en la capa difusa y disminución de la esfera de influencia de las partículas, y ocurre la coagulación por compresión de la capa difusa. Concentraciones elevadas de iones positivos y negativos (fuerza iónica grande) en el agua acarrearán un incremento del número de iones en la capa difusa que, para mantenerse eléctricamente neutra, necesariamente tiende a reducir su volumen, de modo tal que las fuerzas de Van der Waals sean dominantes, y se elimine la estabilización electrostática.

Es importante destacar dos aspectos interesantes sobre este mecanismo de coagulación:

- La concentración del electrolito que causa la coagulación es prácticamente independiente de la concentración de coloides en el agua.

- Es imposible causar la re estabilización de las partículas coloidales con la adición de mayores cantidades de electrolitos debido a que ha ocurrido una reversión de la carga de las mismas, que pasa a ser positiva.
- Coagulación por adsorción y neutralización de la carga. La desestabilización de una dispersión coloidal consiste en las interacciones entre coagulante-coloide, coagulante–solvente y coloide–solvente.

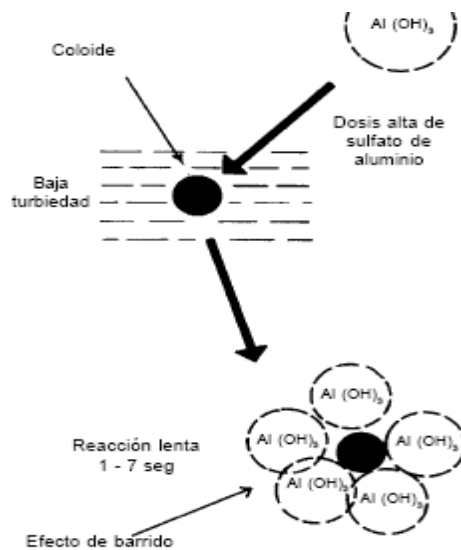
El efecto de adsorción y neutralización de la carga se encuentra estrechamente ligado al de compresión de la doble capa.

- Coagulación por barrido. Este fenómeno ocurre al agregar una concentración de coagulante muy alta, lo cual excede el límite de solubilidad del compuesto presente en el agua. Allí, se precipitan los hidróxidos formados por reacción de la alcalinidad y el agua misma con los coagulantes, lo que lleva a la producción de una masa esponjosa que atrapa en su caída los colides y partículas suspendidas las cuales se ven forzadas a decantar, unidas dentro del precipitado que desciende. Es decir, con dosis de alúmina suficientemente altas, se forma un precipitado de hidróxido de aluminio que físicamente arrastra de la suspensión a las partículas coloidales.

En este mecanismo se observa que la coagulación de las partículas coloidales en el tratamiento del agua es controlada principalmente por la química del hidróxido de aluminio.

Este tipo de coagulación se presenta normalmente cuando el agua es clara y el porcentaje de partículas coloidales es mínimo.

Imagen 1. Coagulación por barrido



Fuente: Arboleda, 2000.

- Coagulación por adsorción y puente químico. La coagulación puede realizarse también usando una variedad significativa de compuestos orgánicos sintéticos y naturales caracterizados por grandes cadenas moleculares, que gozan de la propiedad de presentar sitios ionizables a lo largo de la cadena y de actuar como coagulantes.

Este modelo explica además, la relación existente entre la cantidad de colides y la cantidad de coagulante agregado (Arboleda, 2000).

pH óptimo para la coagulación

Determinar el valor de pH de una muestra de agua es uno de los factores de mayor incidencia sobre el proceso de coagulación, ya que el pH afecta el tiempo requerido para que se forme el floc y la carga sobre las partículas coloidales. Para remover

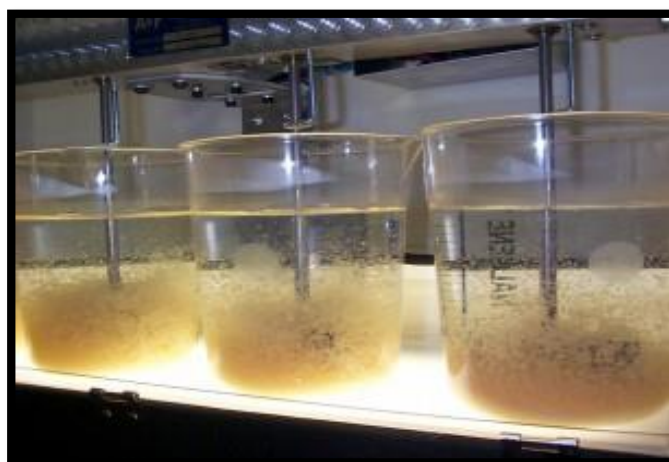
los coloides negativos (varían según la naturaleza del agua), el valor de pH oscila usualmente entre 5,0 y 6,0 (Romero, 2005).

Ensayo de Jarras

El ensayo de jarras es importante para llevar a cabo el control del proceso de coagulación química de aguas. Se realiza, entre otros, con los siguientes fines:

- Selección del tipo de coagulación más efectivo.
- Determinación del pH óptimo de coagulación.
- Evaluación de la dosis óptima de coagulante.
- Determinación de la dosis de ayudas de coagulación.
- Determinación del orden más efectivo de adición de los diferentes productos químicos.
- Determinación de los niveles óptimos de mezcla, gradientes de velocidad y tiempos de mezcla.
- Evaluación de la necesidad de proveer floculación y sedimentación previa a la filtración o factibilidad de filtración directa (Romero, 2005).

Imagen 2. Uso de la prueba de Jarras para definir dosis óptima de insumos químicos



Fuente: <http://www.r-chemical.com/blog/2012/01/31/la-prueba-de-jarras-en-una-planta-de-tratamiento-de-agua-potable/>

Este ensayo consiste en adicionar diferentes dosis o cantidades de coagulantes, generalmente en seis vasos de precipitados, que contienen la misma cantidad de agua.

Los resultados de este ensayo tienen gran aplicabilidad en el diseño y operación de sistemas de tratamiento, así como en la optimización de las plantas ya existentes (Rodríguez, 1995).

Floculación

Una vez dispersados los coagulantes (desestabilizados los coloides) se debe generar una agitación moderada en el agua para permitir el crecimiento del floc, sin romper los agregados preformados. Cuando las partículas chocan unas con otras, se forman coágulos mayores.

Entonces, el fenómeno de floculación ocurre cuando las partículas se aglomeran, incrementan su tamaño y adquieren una mayor densidad gracias a una mezcla lenta y suave (Etienne, 2009).

Este proceso, se ve influenciado por fuerzas químicas y físicas, como lo es el pH, la temperatura del agua, el tamaño y concentración del floc formado en el proceso anterior y la carga eléctrica de las partículas (Arboleda, 2000).

En el diseño de un floculador, se deberán analizar tres características fundamentales, que son:

- La forma de producir la agitación.
- El gradiente de velocidad.
- El tiempo de detención (Isla de Juana, 2005).

En donde el tiempo de detención debe estar entre 10 y 60 minutos.

Los dos objetivos básicos que se persiguen son:

- Reunir los microflóculos para formar partículas mayores con peso específico superior al agua.
- Compactar el floc para producir una baja concentración volumétrica, que permita una alta eficiencia en la fase de separación (sedimentación y filtración).

Tipos de floculadores

Dependiendo del tipo de energía usada para producir la agitación lenta, los floculadores pueden ser de tipo mecánico o hidráulico.

En los **floculadores mecánicos**, se debe contar con una fuente de energía exterior para garantizar una mezcla lenta mediante agitadores mecánicos.

Su principal defecto es la facilidad con la cual producen cortocircuitos, reduciendo así el tiempo que permanece retenido el flujo en el tanque, lo cual lleva a una disminución de la eficiencia del proceso.

Los floculadores pueden ser giratorios (de eje horizontal o de eje vertical) o reciprocantes. El tipo de agitador mecánico de baja velocidad de rotación más usado es el de paletas, los cuales imparten un movimiento giratorio al agua y generan una turbulencia interna. Deben adicionarse pantallas con el fin de prevenir cortocircuitos en el tanque. La entrada y la salida del tanque deben diseñarse de manera que se eviten los cortocircuitos y la destrucción de los flóculos; otro tipo de agitador mecánico comúnmente usado es, el de turbina, es más compacto y menos costoso; genera una velocidad de rotación más alta que el floculador de paletas y por ello, tienen menor tendencia a comunicar un movimiento de rotación a la masa de agua. Los floculadores con agitadores reciprocantes, consisten en estructuras que hacen un movimiento de vaivén en el agua, su ventaja es que los motores se encuentran fuera del agua. (Arboleda, 2000).

Floculadores hidráulicos, los más usados son los de flujo horizontal y flujo vertical. Consisten de tanques con pantallas, en donde el agua circula con una velocidad fija que ocasiona cierta turbulencia en cada cambio de dirección del flujo, garantizando así, una floculación efectiva.

Los de flujo horizontal, consisten en un tanque de concreto dividido por pantallas, dispuestas de tal forma que el agua realice un recorrido de ida y vuelta alrededor de los extremos libres de las mismas. Estos son usados para plantas pequeñas (compactas), que trabajen con una caudal menor de 50 L/s.

Los de flujo vertical, son más compactos que el de flujo horizontal, pues puede hacerse más profundo (2 – 3 m) y por lo tanto requiere menor área superficial, por lo que son diseñados para plantas grandes. Su principal problema se basa en la acumulación de lodos en la parte inferior de los compartimientos, los cuales son difíciles de remover.

En este tipo de floculador, el agua fluye hacia arriba y hacia abajo, por encima y por debajo de las pantallas que dividen el tanque (Romero, 2006).

Sedimentación

Una vez floculada el agua, el problema radica en separar los sólidos del líquido, o sea las partículas coaguladas, del medio en el cual se encuentran suspendidas. Esto se puede conseguir dejando sedimentar el agua (mediante la fuerza de gravedad) o filtrándola.

Por lo tanto, la sedimentación y filtración pueden considerarse como procesos complementarios. La sedimentación separación de los sólidos más densos que el agua y en una velocidad de caída tal que puedan llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable. Mientras que en la filtración, son separados aquellos sólidos que tienen una densidad muy cercana a

la del agua, o que han sido re suspendidos por cualquier causa en el flujo y que por tanto no pueden ser removidos en el proceso anterior (Arboleda, 2000).

Las dos formas más usadas para sedimentar el agua en una planta de tratamiento son: sedimentación simple y sedimentación después de la coagulación y floculación; la sedimentación simple es un tratamiento primario para reducir la carga de solidos sedimentables antes del proceso de coagulación. La sedimentación después de la adición de coagulantes y del proceso de floculación se utiliza para la remoción de solidos sedimentables producidos por el tratamiento químico, como en el caso de la remoción de color y turbiedad (Romero, 2006).

Los sedimentadores convencionales son diseñados teniendo en cuenta el tiempo de retención, el cual debe estar entre 2 y 4 horas y la velocidad de flujo, comprendida entre 0,25 y 1,5 cm / s.

Tipos de sedimentación

La sedimentación ocurre de maneras distintas, que varían según el tipo y concentración de sólidos y su grado de floculación. En la siguiente tabla, se encuentran los diferentes modelos del proceso de clarificación por sedimentación:

Cuadro 2. Modelos del proceso de clarificación por sedimentación

Clarificación por sedimentación tipo	Características de los sólidos en suspensión	Descripción del proceso	Ejemplos
1	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas.	No hay interacción entre las partículas y entre las partículas y el resto del fluido.	Movimiento de sedimentación de partículas en desarenadores o presimentadores.
2	Partículas aglomerables en	Las partículas se aglomeran	Sedimentación de floc en

	soluciones relativamente diluidas.	agrupándose en partículas de mayor tamaño.	decantadores horizontales o de placas.
3	Soluciones de concentración media.	Las partículas interfieren entre sí en su descenso manteniendo posiciones estables.	Deposición de lodos en decantadores de flujo ascendente.
4	Soluciones de alta concentración.	Se forma una estructura entre las partículas que va modificándose lentamente con el tiempo.	Compactación de depósitos de lodos.

Fuente: Arboleda, 2000.

Filtración

La producción de agua clara y cristalina es un prerrequisito para un suministro de agua totalmente confiable y segura. En los procesos de coagulación y sedimentación son removidos casi el 90% de la turbiedad y color, pero cierta cantidad de floc pasa al tanque de sedimentación y por tanto necesita de su remoción. Para ello, se requiere de la filtración; esta, puede efectuarse en varias formas: filtros lentos (baja carga superficial) o filtros rápidos (alta carga superficial), que se pueden dar en medios porosos (pastas arcillosas, papel de filtro) o en medios granulares (arena y antracita).

En una planta de tratamiento, la filtración remueve el material suspendido, medido como turbiedad, compuesto de floc, suelo, metales oxidados y microorganismos.

El concepto fundamental para el diseño de la filtración es la carga hidráulica; para una comunidad pequeña el filtro más usado es filtro lento de arena, cuya tasa de filtración estará entre 2 – 5 m³/m² día.

Medio filtrante

Los más comunes son: arena y antracita; aunque, también se pueden presentar otros medios filtrantes.

- Arena. Es el medio filtrante más usado; la arena usada en los filtros rápidos, es menor a 2,0 mm de diámetro y está compuesta de material silíceo con una dureza de 7 en la escala de Moh (determina comparativamente la dureza de los minerales por la capacidad que tiene cada uno de rayar al otro, un valor de 7 indica cuarzo) y un peso específico no menor a 2. Esta deberá estar limpia, sin contenidos de barro ni materia orgánica.
- Antracita. Debe tener una dureza de 2,7 o mayor en la escala de Moh y su peso específico no deberá ser menor de 1,4. Una de sus principales características es la durabilidad. Tiene una capacidad de retención mayor a la de la arena y es usada con tamaños efectivos entre 0,6 y 1,4 mm de diámetro.
- Otros medios filtrantes. La arena y la antracita pueden ser combinadas, por lo general como una tercera capa, el granate, la ilmenita y la magnetita, son otros medios filtrantes usados actualmente (Arboleda, 2000).

Desinfección

En los procesos de coagulación, floculación y filtración se remueven, con mayor o menor eficiencia, la mayoría de las bacterias y virus presentes en el agua. La desinfección del agua es un proceso en el cual, son destruidos los organismos causantes de enfermedades o patógenos presentes en ella. Estos organismos

presentes en las fuentes de agua potable pueden colonizar tractos gastrointestinales y poner en riesgo la salud de la población (Lee, et al, 2010). Su propósito es impedir la diseminación de enfermedades hídricas, como la enfermedad diarreica agua (EDA) y la infección respiratoria aguda (IRA) evidenciadas en el municipio de Melgar- Tolima. Los principales tipos de organismos son: Bacterias, como la *Escherichia coli*, causante de Diarreas, Protozoarios, Virus y Trematodos.

La eliminación o inactivación de los virus en los procesos de tratamiento de agua potable se pueden cuantificar mediante la medición de las concentraciones de virus o indicadores de virus en el agua antes y después del tratamiento (Teunis, 2009).

No es un proceso instantáneo, se realiza progresivamente a través del tiempo y se considera terminado cuando el 99,99% de los organismos presentes en el agua han muerto.

La velocidad necesaria para llevar a cabo el proceso de desinfección, está dada por un tiempo (t):

$$t = \frac{1}{k} \log \frac{N_0}{N_t}$$

Dónde:

K = constante de velocidad de reacción para un desinfectante determinado

N_0 = número inicial de organismos

N_t = número de organismos para el tiempo t

Los factores que influyen en el proceso de desinfección son:

- a. Relación concentración – tiempo: la eficiencia de desinfección depende de la relación entre el tiempo de contacto y la cantidad de desinfectante dosificado. El tiempo de contacto necesario para matar cualquier tipo de microorganismos, está dado por la siguiente formula:

$$t = \frac{K}{C^n}$$

Dónde:

K = constante de desinfección

C = concentración del desinfectante <mg/L>

n = coeficiente que expresa la eficiencia bactericida del desinfectante y es conocido como el coeficiente de disolución.

- b. Temperatura: las bacterias son capaces de sobrevivir a determinadas temperaturas, generalmente entre 5 °C y 80 °C.
- c. Potencial hidrogeno o pH: las bacterias son altamente susceptibles al pH. Los virus a un pH menor a 4 y mayor a 10 sobreviven solamente horas. El pH óptimo de los microorganismos oscila alrededor de 7.
- d. Número y tipo de organismos: el número de organismos presentes en el agua no afecta el proceso de desinfección.

Para ser usado en las plantas de tratamiento un desinfectante se verá limitado por las siguientes condiciones:

- Deberá ser capaz de destruir los organismos causantes de enfermedades hídricas.
- Deberá realizar esta labor a la temperatura del lugar y en un tiempo adecuado.
- No deberá hacer el agua toxica peligrosa para la salud.
- Deberá ser de fácil obtención, sencillo costo y fácil manejo.
- Su concentración en el agua deberá determinarse rápidamente.

- Deberá dejar un efecto residual, para proteger al agua contra posteriores contaminantes (Arboleda, 2000).

Modos de desinfección el agua

La desinfección del agua se puede presentar en forma natural y artificial; en la primera se refiere a la muerte progresiva de las bacterias, ocasionada por agentes naturales tales como la luz solar, la sedimentación, la filtración o estabilización de la materia orgánica que disminuye la reserva de alimentos para los microorganismos.

La desinfección artificial puede realizarse mediante agentes físicos o químicos; los agentes físicos más relevantes son el calor y los rayos ultravioleta. Los agentes químicos más importantes son: los halógenos, la plata ionizada y el ozono.

Rayos ultravioleta. Este método ha sido usado para desinfectar el agua desde 1990, ha ganado popularidad en el agua potable como un desinfectante primario, ya que es muy eficaz en la inactivación de *cryptosporidium oocyst* (Protista asociado a la enfermedad *criptosporidiosis* diarreica en seres humanos) los cuales son resistentes a la desinfección química. Se realiza pasando una delgada lámina de agua bajo una fuente de rayos ultravioleta. La penetración de los rayos y la eficiencia de la desinfección, dependen de la turbiedad del agua (Viessman, et al, 2009). Los microorganismos son destruidos por efectos de la luz ultravioleta cuándo esta penetra a través de las células y es absorbida por el ácido nucleico, provocando una reordenación de la información genética e impidiendo así la reproducción celular. Unos de los beneficios de usar esta técnica, es que no hay la necesidad de añadir químicos al agua, no se forman subproductos de desinfección en el agua y es de alta rentabilidad. Sin embargo, con mucho tiempo de radiación (horas), se degrada la materia orgánica lo cual lleva a un crecimiento de bacterias en el agua (Lehtola, et al, 2003).

Calor. Durante un tiempo determinado se alcanza una temperatura de ebullición lo cual es suficiente para destruir cualquier microorganismo patógeno. Generalmente es un sistema de desinfección de uso doméstico (Arboleda, 2000).

Cloro. La cloración es el proceso de desinfección más popular y el que hasta el momento reúne las mayores ventajas, puesto que es eficiente, de fácil aplicación, económico, se encuentra disponible en estado gaseoso, líquido y sólido (forma granular), deja efecto residual, tiene alta toxicidad para los microorganismos causantes de enfermedades hídricas y es un oxidante poderoso; una desventaja es que es altamente corrosivo, en algunos casos produce un sabor desagradable en el agua y puede llegar a ocasionar serios problemas de olores debido a la capacidad que tiene de formar clorofenoles (Romero, 2006).

➤ Reacciones de cloro con el agua

En el tratamiento de aguas, el cloro es usado en forma de gas generado a partir de la vaporización de cloro líquido almacenado bajo presión en un cilindro; en forma líquida, usualmente el hipoclorito de sodio y sólido, comúnmente hipoclorito de alto grado o hipoclorito de calcio.

Al adicionarle cloro al agua, ya sea en cualquiera de sus formas, este se hidroliza reaccionando con el agua (H_2O), luego se combina con el amoníaco presente y con la materia orgánica, así como con otras sustancias químicas para producir gran diversidad de compuestos, que pueden ser desinfectantes o no.

Se considera que existen dos tipos de reacciones:

Las hidrolíticas, en donde el cloro interacciona con la molécula de agua para producir ácido hipocloroso ($HOCl$) e ion hipoclorito (OCl). A estos compuestos se les denomina cloro libre disponible o residual de cloro libre.

El cloro residual se forma a través de dos etapas:

a. Hidrolisis, reacciona en cuestiones de segundo:



Se observa que, al adicionar cloro gaseoso al agua bajara su alcalinidad y posteriormente su pH debido a la producción del ácido fuerte, HCl y del ácido hipocloroso, HOCl

b. Disociación, en donde el ácido hipocloroso se ioniza para formar ion hipoclorito, asi:



Como se evidencia en la reacción, la disociación del ácido hipocloroso depende de la concentración del pH (ion hidrógeno). Un pH bajo inhibe la disociación del HOCl; el residual es predominantemente HOCl a pH igual a seis o menor. A pH igual a 7,7 los residuales de HOCl y OCl^- son aproximadamente similares y a pH igual o mayor que nueve casi todo el residual es OCl^- .

Se considera, que el ácido hipocloroso es 80 a 100 veces más efectivo que el ion hipoclorito para eliminar la E. coli.

Si el cloro es dosificado como hipoclorito de sodio, se tiene:



En este caso, se presenta un incremento de la alcalinidad, dependiente de la magnitud con el OCl^- reacciones con el agua.

Si el cloro se agrega como hipoclorito de calcio, se tiene:



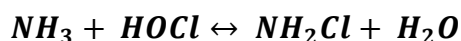
En este caso, habrá un aumento tanto en la alcalinidad del agua como en la dureza total.

En ambas reacciones (cloro dosificado como hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio), el ion hipoclorito reacciona con el hidrogeno para formar acido hipocloroso, asi:



Las de oxidación – reducción: el cloro como ya se había mencionado, es un fuerte oxidante, que puede reaccionar con muchas de las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua. En estas reacciones, el cloro es combinado con:

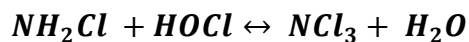
a. Nitrógeno amoniacal para formar cloramidas; las más frecuentes son monocloramida (NH_2Cl) y la dicloramina ($NHCl_2$). Ambas tienen un poder bactericida varias veces menor que el ácido hipocloroso, pero son más estables y por consiguiente su efecto dura mucho más tiempo en el agua. En determinadas condiciones puede aparecer tricloramina. Las reacciones son:



A partir de la formación de la monocloramida, se tiene:



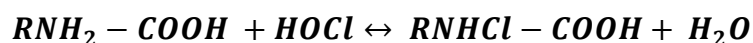
A partir de la dicloramina se forma la tricloramina asi:



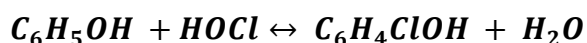
La distribución en el agua entre uno y otro tipo de cloramina depende del pH, la temperatura y de la proporción existente entre el cloro y el amoniaco expresado como nitrógeno.

b. Aminoácidos, materiales proteínicos y orgánicos y sustancias químicas; el cloro reacciona con nitrógeno orgánico y con ciertas sustancias químicas perdiendo su poder oxidante para producir cloruros, ácido clorhídrico, óxidos de nitrógeno y gran variedad de compuestos, aun no identificables, lo cual constituye la demanda. El nitrógeno orgánico que está formado principalmente por proteínas, peptonas, aminoácidos y materia orgánica en general, reacciona muy lentamente durante días con el cloro; mientras que el nitrógeno amoniacal y las sustancias químicas tales como los fenoles, el hierro, el ácido sulfhídrico, el manganeso la alcalinidad reacciones en menos de una hora.

La reacción con los aminoácidos, puede expresarse así:



La reacción con los fenoles es la siguiente:



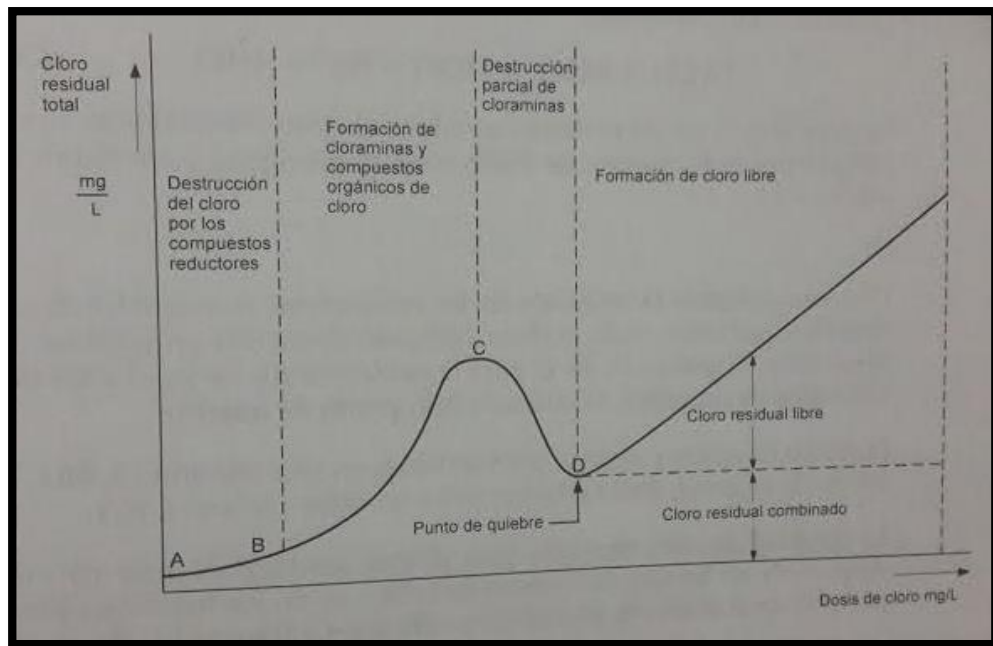
En esta reacción, es producido el clorofenol el cual tiene un sabor muy desagradable en el agua (Arboleda, 2000).

Fenómeno de punto de quiebre

Al adicionarle cloro a un agua que contiene agentes reductores, amoníaco y aminas orgánicas, si se mide y se construye una gráfica de la dosis aplicada contra los residuales obtenidos, resulta una curva denominada curva de la demanda de cloro. Allí, se observa un incremento inicial en los residuales de cloro seguido de una declinación y luego, finalmente, de otro incremento, a partir de un punto denominado punto de quiebre. Inicialmente se logra una satisfacción de la demanda de cloro, a

continuación las monocloraminas y dicloraminas aumentan y luego disminuyen. El segundo incremento se da a partir del punto de quiebre y cualquier cloro agregado produce residuales de cloro libre.

Imagen 3. Curva de demanda de cloro



Fuente: Romero, 2005.

El análisis de la curva de demanda de cloro permite realizar las siguientes observaciones:

A – B

El cloro reacciona inicialmente con los agentes reductores presentes y no forman un residual detectable. La dosis de cloro en el punto B representa la cantidad de cloro requerida para satisfacer la demanda ejercida por los agentes reductores del agua.

B – C

Una vez satisfecha la demanda ejercida por los agentes reductores o demanda inmediata de cloro, este reacciona con todo el amoníaco y las aminas orgánicas presentes para formar un residual de cloro combinado. Cuando todo el amoníaco y las aminas orgánicas han reaccionado con el cloro, empieza a formarse un residual de cloro libre. A una cierta concentración crítica, punto C, la concentración de cloro libre es lo suficientemente alta como para oxidar las cloraminas.

C – D

Oxidación de cloraminas:



La destrucción de las cloraminas reduce el cloro residual y es acompañada por la formación de óxido nitroso, nitrógeno y tricloruro de nitrógeno.

D

Una vez completa la oxidación de los compuestos susceptibles de ser oxidados por cloro, todo el cloro agregado desarrolla un residual de cloro libre. El punto D, en el cual la oxidación de los productos del amoníaco es completa, se conoce como punto de quiebre.

La determinación de la demanda de cloro permite cuantificar el número y la capacidad de los cloradores requeridos para la desinfección del agua, así como para decidir el tipo de agente desinfectante, recipientes, cantidades de cloro, entre otros.

$$\text{demanda de cloro} = \text{dosis de cloro} - \text{cloro residual}$$

La demanda de cloro varia para los diferentes tipos de agua; para la misma agua, depende la dosis de cloro aplicada, tipo de residual deseado, tiempo de contacto pH y temperatura. Con un mayor tiempo de contacto y una mayor temperatura, es más efectiva la desinfección. En cambio, un pH alto reduce la concentración de ácido hipocloroso y así disminuye la efectividad de la cloración (Romero, 2005).

Yodo. El yodo es el halógeno de mayor peso atómico y por su bajo poder oxidante resulte ser el más estable. El yodo al mezclarse con agua forma ácido hipoyodoso, así:



No forma yodaminas, no reacciona con los fenoles como el cloro; el yodo produce un sabor medicinal en el agua en concentraciones mayores a 1mg/L.

Su mayor dificultad en el uso, radica en el costo, pues es muchísimo más costoso que el cloro, además Gno son muy conocidos los efectos fisiológicos que pueda producir su ingestión continuada (Romero, 2006).

Bromo. Al igual que los otros halógenos, el Bromo tiene propiedades desinfectantes, reacciona con amoníaco para formar brominas. Al hidrolizarse en el agua forma ácido hipobromoso, así:



En la destrucción de microorganismos, la eficiencia del bromo es comparable con la del yodo y el cloro, la diferencia radica en que es más costoso que dichos compuestos y crea problemas en su manejo (Arboleda, 2000).

Plata ionizada. Los iones de plata son un desinfectante generalmente usado en países europeos, especialmente en plantas de purificación de uso industrial.

Ozono. Es un excelente agente desinfectante, lo cual lo hace un competidor del cloro; tiene grandes ventajas, entre las cuales su capacidad para remover muchos problemas de color, olor y sabor, y en que su potencia no se ve alterada por los compuestos de amoníaco, contaminantes orgánicos e inorgánicos ni por el pH.

Es muy efectivo frente a las bacterias, sobre todo a las Gram – negativas (*E. coli*); sin embargo, los microorganismos Gram – negativos presentan una mayor resistencia a este (*Streptococcus*).

Como ventaja y desventaja, tiene que, como el oxígeno es poco soluble en agua y debido a su inestabilidad no deja residual en ella, es decir, que una vez descompuesto el único material residual es el oxígeno disuelto (Rodríguez, 2003).

Sistema compacto de potabilización.

En un sistema compacto de potabilización se busca garantizar la calidad del recurso hídrico en procesos operados desde un solo módulo, para ello se implementan nuevos métodos de potabilización que en su desarrollo requieren de una menor infraestructura comparada con la convencional; es así, como se pueden encontrar interrelaciones entre etapas; como es el caso de la decantación y floculación, debido a la recirculación de mantos de fango que se aprovechan gracias a la retención de algunos reactivos que no se han agotado en su totalidad y que en el procesos generan un proceso floculación más rápido y eficaz, permitiendo un ahorro sustancioso de reactivos y llegado el caso poder trabajar con la misma eficiencia teniendo el proceso en una etapa estática.

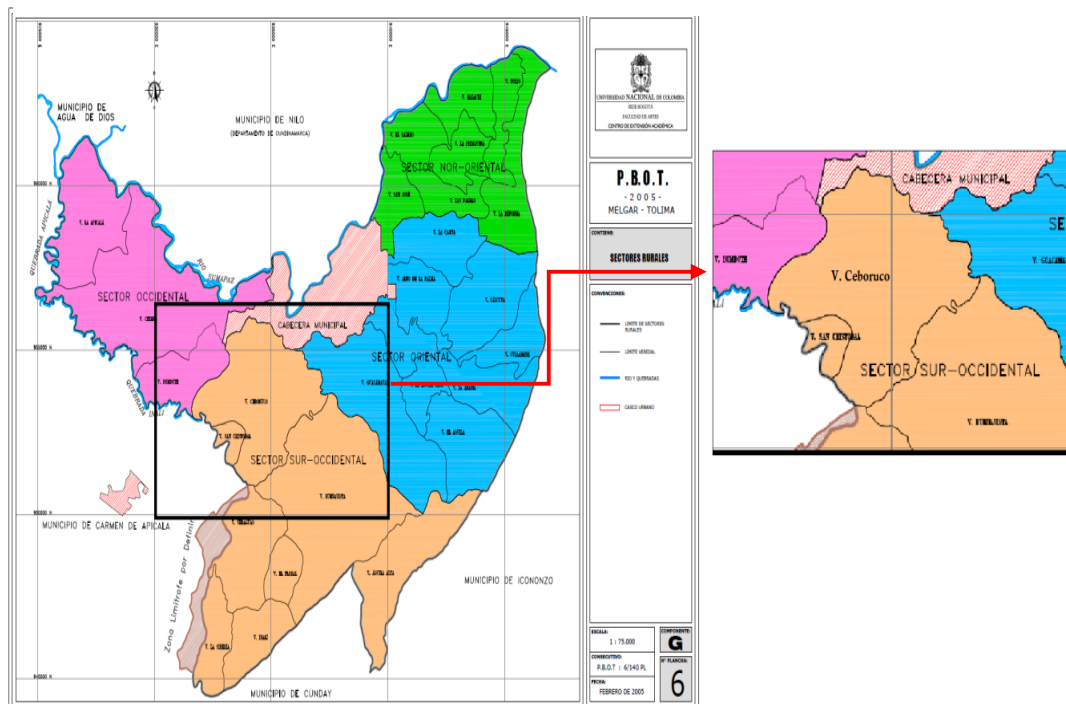
En cuanto a la filtración se implementan filtros abiertos de arena y filtros de carbón activo en granos abiertos, para ello se hace necesario definir la granulometría del lecho filtrante y la altura del lecho en función del floc obtenido anteriormente, todo esto garantiza un pre tratamiento de excelente calidad que de paso a los tratamientos específicos donde se encuentra, dependiendo el tipo de gua y sus

características los procesos de aireación, desferrificación biológica, eliminación de nitratos, fluoruros, arsénico y micro contaminantes orgánicos, entre otros, que posteriormente darán lugar a nuevos procedimientos que relacionados con los anteriores y aplicados de una forma correcta permitirían innovar en el proceso de potabilización; finalmente se procede a la desinfección y entrega del agua tratada (Degremont, 1979).

5.3 MARCO GEOGRÁFICO

La Granja la Fortaleza se encuentra ubicada en las coordenadas 4° 10' 30,31" Norte 74° 40' 01,78" Oeste en la vereda Ceboruco (área de 1304 Ha) en el sector suroccidental del municipio de Melgar- Tolima a una altura sobre el nivel del mar de 362 metros (Google Earth).

Imagen 4. Ubicación de la vereda Ceboruco en el municipio de Melgar



Fuente: P.B.O.T Municipio de Melgar-Tolima. Mapa veredal del municipio de Melgar, Tolima. 2005.

Información general del municipio de Melgar

Límites del municipio:

Norte: Departamento de Cundinamarca

Sur: Municipio de Cunday

Oriente: Municipio de Icononzo

Occidente: Municipio del Carmen de Apicala

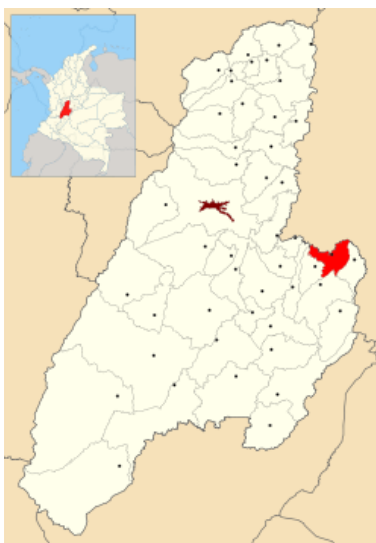
Extensión total: 201 Km²

Extensión área urbana: 16 Km²

Extensión área rural: 185 Km²

La cabecera municipal se encuentra localizada en 40°12" Latitud Norte, 74°39" Longitud Oeste. La altura sobre el nivel del mar es de 323 metros. La temperatura media registrada es de 28° C. Esta comunicada con la ciudad de Bogotá D.C a una distancia de 98 Km.

Imagen 5. Ubicación de Melgar en el Departamento del Tolima



Fuente: Alcaldía Municipal de Melgar.

5.4 MARCO LEGAL

Para el desarrollo del Presente proyecto se tuvieron en cuenta las siguientes normas, decretadas por los Ministros de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en el caso de la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1575 de 2007.

NORMA	ARTICULO	DESCRIPCIÓN
Constitución Política de Colombia 1991	1	Colombia es un Estado social de derecho, fundada en el respeto de la dignidad humana, en el trabajo y la solidaridad de las personas que la integran y en la prevalencia del interés general.
Capítulo 3. De los derechos colectivos y del ambiente	79	Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano.
Capítulo 5. De la finalidad social del Estado y de los servicios públicos.	365	Los servicios públicos son inherentes a la finalidad social del Estado. Es deber del Estado asegurar su prestación eficiente a todos los habitantes del territorio nacional.
	366	Son finalidades sociales del Estado garantizar el bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población.
	367	La ley fijará las competencias y responsabilidades relativas a la prestación de los servicios públicos domiciliarios, su cobertura, calidad y financiación.
Resolución 2115 de 2007		Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y

		vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
<p>capítulo II</p> <p>Características físicas y químicas del agua para consumo humano.</p>	2	Características físicas: el agua para consumo humano no podrá sobrepasar los valores máximos aceptables para cada una de las características físicas.
	3	Conductividad. El valor máximo aceptable para la puede ser hasta 1000 microsiemens/cm.
	4	Potencial de hidrógeno: el valor para el pH del agua para consumo humano, deberá estar comprendido entre 6,5 y 9,0.
	6	Características químicas de sustancias que tienen implicaciones sobre la salud humana: Las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana.
	7	Características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.
	9	<p>Características químicas de otras sustancias utilizadas en la potabilización:</p> <p>El valor aceptable del cloro residual libre en cualquier punto de la red de distribución del agua para consumo humano deberá estar comprendido entre 0,3 y 2,0 mg/L.</p> <p>La dosis de cloro por aplicar para la desinfección del agua y asegurar el residual libre debe resultar de pruebas frecuentes de demanda de cloro.</p>

<p>Capítulo III</p> <p>Características microbiológicas</p>	<p>10</p>	<p>Técnicas para realizar análisis microbiológicos: técnicas aceptadas para realizar los análisis microbiológicos del agua para consumo humano.</p> <p>a) Para Escherichia Coli y Coliformes totales: Filtración por membrana, sustrato definido, enzima sustrato y presencia - ausencia.</p>
<p>Capítulo IV</p> <p>Instrumentos básicos para garantizar la calidad del agua para consumo humano</p>	<p>13</p>	<p>Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano – IRCA-</p> <p>El valor del IRCA es cero (0) puntos cuando cumple con los valores aceptables para cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas contempladas en la presente Resolución y cien puntos (100) para el más alto riesgo cuando no cumple ninguno de ellos.</p>
	<p>14</p>	<p>Cálculo del IRCA: El cálculo del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano – IRCA, se realizará utilizando las siguientes fórmulas:</p> <p>El IRCA por muestra:</p> $IRCA (\%) = \frac{\Sigma \text{puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\Sigma \text{puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas}} \times 100$ <p>El IRCA mensual:</p> $IRCA (\%) = \frac{\Sigma \text{de los IRCAs obtenidos en cada muestra realizada en el mes}}{\text{Número total de muestras realizadas en el mes}}$
	<p>15</p>	<p>Clasificación del nivel de riesgo:</p> <p>Teniendo en cuenta los resultados del IRCA por muestra y del IRCA mensual, se define una clasificación del nivel de riesgo del agua suministrada para el consumo humano por la persona prestadora y se señalan las</p>

		acciones que debe realizar la autoridad sanitaria competente.
Decreto 1575 de 2007		Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
Capítulo II Características y criterios de la calidad del agua para consumo humano	3	Características del agua para consumo humano: Las características físicas, químicas y microbiológicas, que puedan afectar directa o indirectamente la salud humana, así como los criterios y valores máximos aceptables que debe cumplir el agua para el consumo humano, serán determinados por los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
Capítulo III Responsables del control y vigilancia para garantizar la calidad del agua para consumo humano	10	Responsabilidad de los usuarios: Todo usuario es responsable de mantener en condiciones sanitarias adecuadas las instalaciones de distribución y almacenamiento de agua para consumo humano.
	12	Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano, IRCA: Es el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

Para el desarrollo del presente proyecto se plantearon y siguieron los siguientes pasos, en el cual:

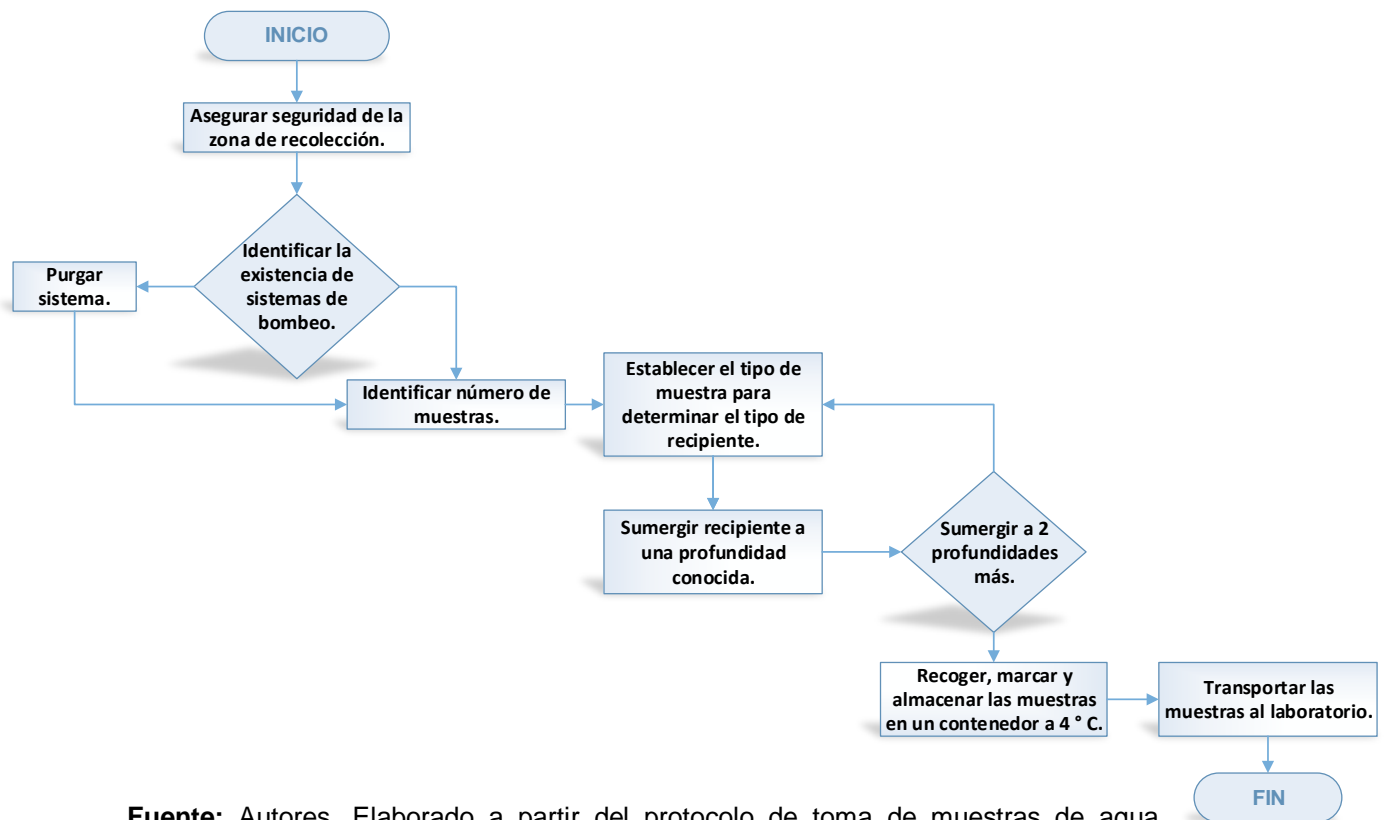
1.1 se realizaron visitas frecuentes al lugar de trabajo (Granja La Fortaleza) en un periodo aproximado de cuatro meses, es decir, se llevó a cabo un total de 10 visitas; durante las cuales se tomaron muestras de agua, siendo estas recolectadas en recipientes de Polietileno, traslucidos, con tapa de seguridad blanca y manteniéndose debidamente refrigeradas para el análisis de parámetros físicos y químicos, tales como, acidez total, alcalinidad, cloruros, dureza total, pH, turbiedad, nitritos, nitratos y sulfatos. Para los análisis de calcio, cadmio, hierro, magnesio, plomo y zinc se usaron recipientes de Polietileno, traslucidos y con tapa de seguridad roja. Se usaron recipientes de vidrio color ámbar con boca angosta y con tapa rosca blanca, para los análisis de cloro residual y nitrógeno amoniacal; en el caso del nitrógeno amoniacal, se adicionó ácido sulfúrico hasta $\text{pH} < 2$ con el fin de preservar la muestra para un análisis confiable. Las muestras obtenidas se mantuvieron refrigeradas hasta el lugar de destino.

Para el análisis microbiológico (Coliformes fecales), se emplearon recipientes de vidrio de boca ancha con tapa de rosca blanca. Para la preservación de la muestra, dichos recipientes fueron previamente esterilizados y al momento de adquirirlos se tuvo en cuenta que la tapa estuviera identificada como *EST* que significa Estéril. Adicionalmente, se tuvieron en cuenta algunas recomendaciones como, no enjuagar el envase con la muestra y dejar 2 cm entre la boca del envase y la muestra (Antek s.a., 2012).

Las muestras fueron extraídas de la fuente hídrica existente en la zona de estudio, en este caso agua subterránea y fueron tomadas siguiendo el protocolo presentado

por el IDEAM, en: toma de muestras de aguas subterráneas, 2013, las muestras recolectadas fueron representativas para el estudio de investigación y se tomaron en cuentas todas las precauciones señaladas para garantizar que, en lo posible, las muestras no sufran ningún cambio durante el intervalo comprendido entre el muestreo y el análisis.

Imagen 6. Método para la toma de muestras de aguas subterráneas



Fuente: Autores. Elaborado a partir del protocolo de toma de muestras de agua subterránea del IDEAM, 2013.

1.2 Una vez tomadas las muestras fueron transportadas hacia los laboratorios de la Universidad Libre sede Bosque Popular para analizar los parámetros de calidad requeridos en el trabajo, en este caso, cumpliendo con lo establecido en la Resolución 2115 de 2007 para obtener un agua potable totalmente confiable.

Los ensayos y métodos realizados, se basaron de acuerdo a los procedimientos descritos en el libro: Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, vigésima segunda edición, utilizando los siguientes:

Tabla 1. Parámetros y métodos de análisis de los Standard Methods

Parámetro	Método de análisis
Turbiedad	ME 2130 B
Alcalinidad	ME 2320 B
Acidez	ME 2310 B
Ph	ME 4500 H ⁺ B
Coliformes fecales	ME 9260 F
Nitrógeno amoniacal	ME 4500 NH ₃ C
Cloro residual	ME 4500 Cl
Dureza total	ME 2340 C
Calcio	ME 3500 Ca B
Cadmio	ME 3500 Cd
Hierro	ME 3500 Fe B
Magnesio	ME 3500 Mg B
Plomo	ME 3500 Pb B
Zinc	ME 3500 Zn A
Cloruros	ME 4500 Cl ⁻ D
Nitritos	ME 4500 NO ₂ B
Nitratos	ME 4500 N ₃ C
Sulfatos	ME 4500 SO ₄ ²⁻ E

Fuente: Autores

Dentro de los ensayos, se realizaron pruebas de jarras con el fin de determinar las dosis requeridas para lograr el proceso de desestabilización de partículas presentes en el agua, para su posterior sedimentación.

1.3 Para llevar a cabo **la prueba de jarras** y determinar la dosis requerida, fue necesario seguir los siguientes pasos, en donde:

A. Se determinó la temperatura del agua cruda, la turbiedad, el pH y la alcalinidad.

B. Posteriormente, se añadieron los coagulantes al agua en dosis progresivas en cada vaso de precipitado de la siguiente forma:

- Se colocó previamente en las jarras (4 vasos de precipitado de 500 mL cada uno) el agua de la muestra y se inyectó rápidamente por medio de pipetas aforadas la dosis de coagulante requerido mientras giraban las paletas a 200 rpm. Esto, produjo una mezcla muy completa. Una vez realizada la mezcla rápida se disminuyó la velocidad de rotación de las paletas entre 30 – 40 rpm y se dejó flocular el agua en un tiempo aproximado de 15 a 30 minutos. Luego se suspendió la agitación, se extrajeron las paletas y se dejó sedimentar el agua.

C. Una vez mezclados los coagulantes con el agua se realizaron determinaciones de tipo **cualitativo y cuantitativo**; en las **determinaciones cualitativas**, se observó el tamaño del floc producido y se evaluó cualitativamente según sus características. Se escogió como dosis optima la de la jarra que produjo partículas más grandes, de mayor velocidad de asentamiento aparente y la que dejó ver el agua más cristalina entre los flóculos formados. Adicionalmente, determinando el tiempo que tarda en aparecer el primer inicio de formación de floc se pudo calificar la velocidad de reacción. Para poder realizar las **determinaciones**

cuantitativas, se extrajeron muestras del sobrenadante después de un periodo de decantación no inferior a 10 minutos para medir turbiedad, alcalinidad y pH.

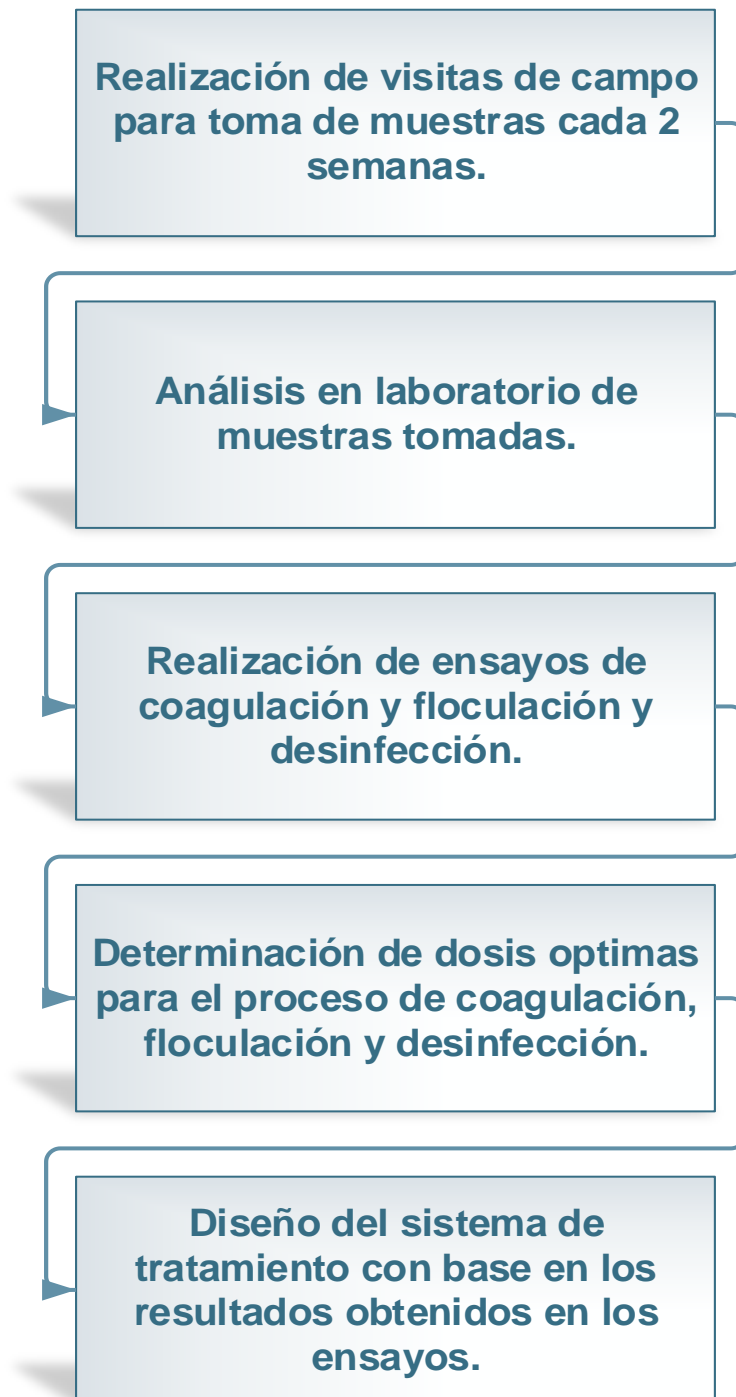
D. Luego de realizar estas determinaciones, los datos obtenidos fueron anotados en un formato; dicho formato contiene los datos iniciales de los análisis realizados al agua cruda tales como, temperatura, dureza total, pH, turbiedad y alcalinidad total y el tiempo de mezcla lenta, el tiempo de mezcla rápida y la velocidad de rotación de las paletas.

E. Finalmente, se determinó con la mejor jarra la dosis requerida.

1.4 Adicional a este ensayo se realizaron las **pruebas de punto de quiebre** con el objeto de establecer la dosificación de cloro, como se describe en el Marco Teórico (fenómeno de punto de quiebre). La determinación del cloro residual libre se realizó por el método espectrofotométrico, tal y como se describe en el libro “Teoría y práctica de la Purificación del agua” de Jorge Arboleda Valencia.

1.5 Con base en los resultados de los análisis de laboratorio, las pruebas de jarras y las pruebas de punto de quiebre se realizó el diseño de la planta de potabilización para lo cual se tomaron como base las técnicas de diseño encontradas en las diferentes referencias bibliográficas consultadas.

Imagen 7. Diagrama Metodológico



Fuente: Autores.

7. RESULTADOS OBTENIDOS

Determinación del coagulante adecuado - ensayos de jarras

Inicialmente, se realizaron pruebas para determinar el tipo de sustancia a dosificar en el proceso de coagulación; para ello, se evaluaron parámetros como pH, temperatura y turbiedad los cuales permitieron determinar el comportamiento del agua cruda ante dos agentes coagulantes empleados como el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y policloruro de aluminio (PAC) dosificado a concentraciones del 1%. Se dosificaron diferentes volúmenes de los coagulantes en incrementos de 1 mL, seleccionando la dosis con los valores más óptimos como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2. Determinación del coagulante óptimo.

Fecha de Muestreo	Muestra Inicial			Sulfato de Aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) 1%				Policloruro de Aluminio 1%			
	pH	T (°C)	Turbiedad	Dosis (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad	Dosis (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad
12-may-14	5,82	15,70	>1000	1	5,91	16,2	3,32	1	6,2	17,3	3,24
	Gradiente de Velocidad (rpm)			40				40			
	Tiempo de Floculación (min)			15				15			
	Tiempo de Decantación (min)			7				6			

Fuente: Autores

En el **anexo A**, Ensayo de jarras – Determinación del coagulante, se encuentran los resultados obtenidos de los parámetros analizados para las diferentes cantidades de coagulante adicionado.

De acuerdo a la tabla 2, se seleccionó el policloruro de aluminio y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en cuanto a la cantidad de coagulante se estimaron intervalos cercanos para los diferentes ensayos realizados que permitieron identificar con mayor exactitud el volumen a suministrar. En la tabla 3 se muestra

una síntesis de la cantidad suministrada para cada prueba realizada. El compendio de todos los análisis se encuentra en el **anexo B**.

Tabla 3. Dosis óptima del coagulante encontrada en cada uno de los ensayos realizados

Ensayo Nº	Muestra Inicial				Cálculo	Policloruro de Aluminio 1%					Cálculo
	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación EDTA (mL)	DUREZA (mg CaCO ₃ /L)	Dosis (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Dureza (mL EDTA)	DUREZA (mg CaCO ₃ /L)
0	7,38	15,00	83,26	4,60	46,00	0,75	7,60	15,10	3,59	4,00	40,00
1	6,14	17,60	>1000	3,50	35,00	1,00	6,38	17,60	11,35	3,30	33,00
2	7,22	17,30	103,00	4,20	42,00	1,00	7,49	18,40	24,03	4,00	40,00
3	5,99	14,50	55,00	3,00	30,00	0,50	6,32	16,20	17,04	2,80	28,00
4	6,39	18,50	254,00	4,00	40,00	0,75	6,76	19,20	21,60	3,80	38,00
5	6,22	16,30	104,00	3,50	35,00	1,00	6,39	18,20	33,65	3,20	32,00
6	7,02	15,40	197,00	3,30	33,00	0,75	7,31	14,70	13,55	3,00	30,00
7	7,77	16,00	350,00	4,00	40,00	1,00	7,41	16,20	71,00	3,70	37,00
8	7,63	17,80	142,50	4,50	45,00	0,75	7,83	17,70	12,20	3,80	38,00

Fuente: Autores

Determinación de las características físicas, químicas y microbiológicas

Una vez realizadas las pruebas de jarras, se llevaron a cabo los análisis de las características químicas (exceptuando la determinación de dureza, los resultados se encuentran en el anexo B) y microbiológicas en el laboratorio con el fin de comparar los resultados con los límites permisibles establecidos por la norma Resolución 2115 de 2007. Las tablas que se muestran a continuación representan un promedio de los cálculos de los datos obtenidos en el laboratorio del análisis de las características químicas y microbiológicas del agua cruda y del agua con presencia de Policloruro de aluminio, que será llamada en adelante, agua tratada.

El análisis de las características físicas del agua (pH, temperatura y turbiedad) se llevó a cabo durante cada uno de los en los ensayos de jarras realizados.

Tabla 4. Promedio de los cálculos de las características químicas

Características químicas		
Parámetro	Muestra de agua inicial	Muestra de agua tratada
ALCALINIDAD <mg CaCO ₃ /L>	34,634	28,214
ACIDEZ <mg CaCO ₃ /L>	33,176	22,445
SULFATOS <mg SO ₄ ⁻ /L>	1,895	1,655
NITRITOS <mg NO ₂ ⁻ /L>	0,005	0,000
NITRATOS <mg NO ₃ ⁻ /L>	0,000	0,000
CLORUROS <mg Cl ⁻ /L>	163,688	37,488
CADMIO <mg Cd/L>	0,000	0,000
PLOMO <mg Pb/L>	0,000	0,000
CALCIO <mg Ca/L>	7,447	7,256
HIERRO <mg Fe/L>	0,058	0,043
MAGNESIO <mg Mg/L>	0,668	0,651
ZINC <mg Zn/L>	0,000	0,000

Fuente: Autores

Tabla 5. Porcentaje de remoción de las características microbiológicas

Características microbiológicas	
Parámetro	% de remoción
Escherichia coli	98,9%

Fuente: Autores

En el **anexo C** se muestran los resultados obtenidos para cada una de las muestras de agua analizadas en el laboratorio, así como una breve explicación de sus respectivos cálculos.

Determinación de Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal fue determinado por el método titulométrico con HCl 1 N. se determinó el Nitrógeno amoniacal presente en las muestras de agua (inicial y tratada) debido a que las reacciones del cloro con amonio y compuestos orgánicos – N en el agua pueden formar cloraminas y organocloraminas afectando el proceso de desinfección. Los resultados obtenidos de las muestras de agua analizadas indican la presencia de nitrógeno amoniacal.

En el **anexo D** se observan los datos obtenidos de la titulación con HCl para la determinación de Nitrógeno amoniacal, así como sus respectivos cálculos.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 CALIDAD DEL AGUA

Teniendo en cuenta los valores máximos permisibles establecidos en la Resolución 2115 de 2007 se evaluaron parámetros en el laboratorio para garantizar la calidad del agua tratada y así mismo determinar su viabilidad para llevar a cabo el proceso de potabilización.

Características físicas

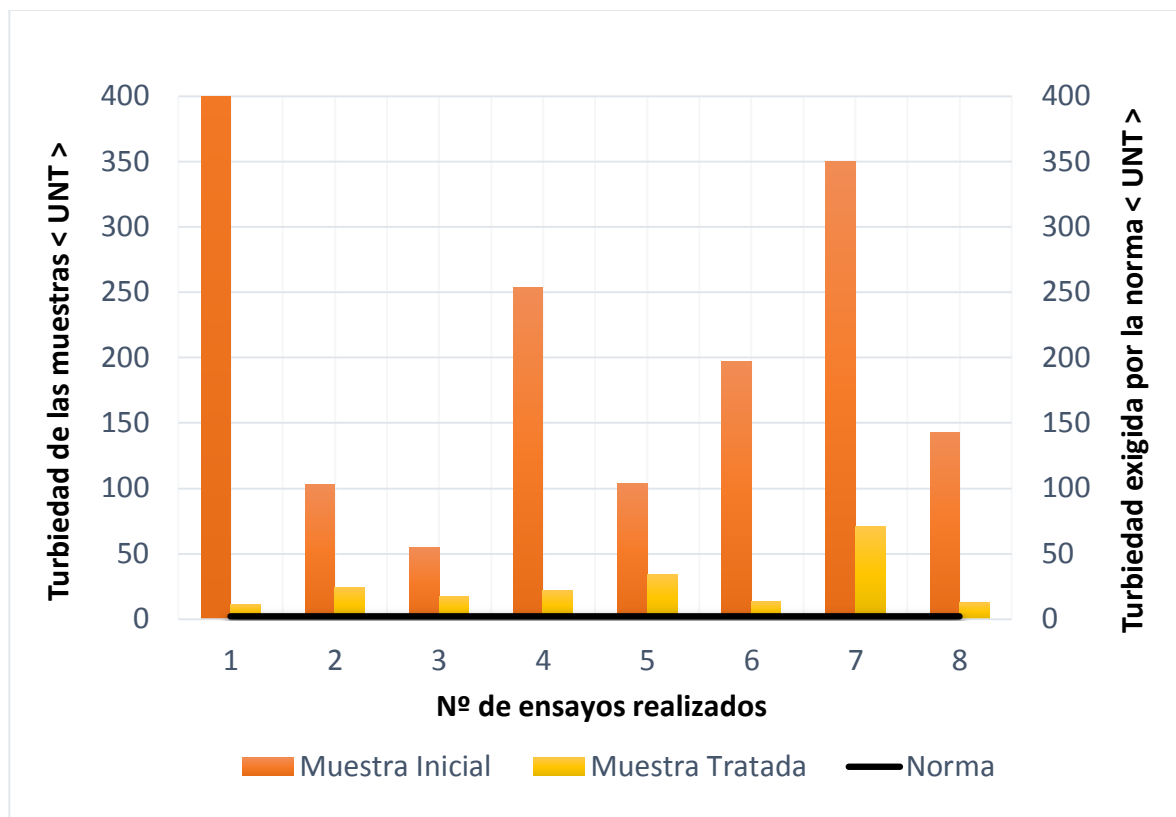
Olor y sabor: Basado en los sentidos se evaluaron las características estéticas del agua (aspecto, olor y sabor), obteniendo como resultado una consideración favorable y óptima para el consumo humano. Aunque estos parámetros no generan efectos adversos en la salud humana, si son considerados importantes en cuanto a la calidad y aceptación del agua tratada.

Potencial de Hidrogeno: El valor del pH para consumo humano debe estar comprendido entre 6,5 – 9,0, en los análisis realizados para las muestras de agua tratada (con adición de policloruro de aluminio al 1%) se obtuvieron valores aproximados entre 6,3 y 7,8; Aunque se ha demostrado que el valor del pH no afecta directamente la salud de los consumidores, es un parámetro operativo importante en la calidad del agua, pues, llevar el control del pH permite garantiza una clarificación y desinfección eficaz.

Debido a que las características del agua pueden ser variables, para ajustar el valor del pH se podrá adicionar ácidos o bases según sea el caso, como, ácido sulfúrico y cal apagada, carbonato de calcio e hidróxido de sodio respectivamente (CONAGUA, 2007).

Turbiedad:

Grafica 1. Resultados de turbiedad en los ensayos de laboratorio realizados



Fuente: Autores

El valor máximo aceptable es de 2 unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT), si bien en los ensayos de jarra realizados para los procesos de coagulación y floculación de las muestras de agua no se alcanzó el valor deseado, si se evidenció una significativa reducción de este parámetro con relación al agua cruda; se espera que con la ayuda de los siguientes procesos (sedimentación y filtración) se alcance a suplir los valores exigidos por la Resolución 2115. Valores elevados de turbiedad son sanitariamente inaceptables debido a las pocas garantías que genera para el consumidor (Vargas, 2004).

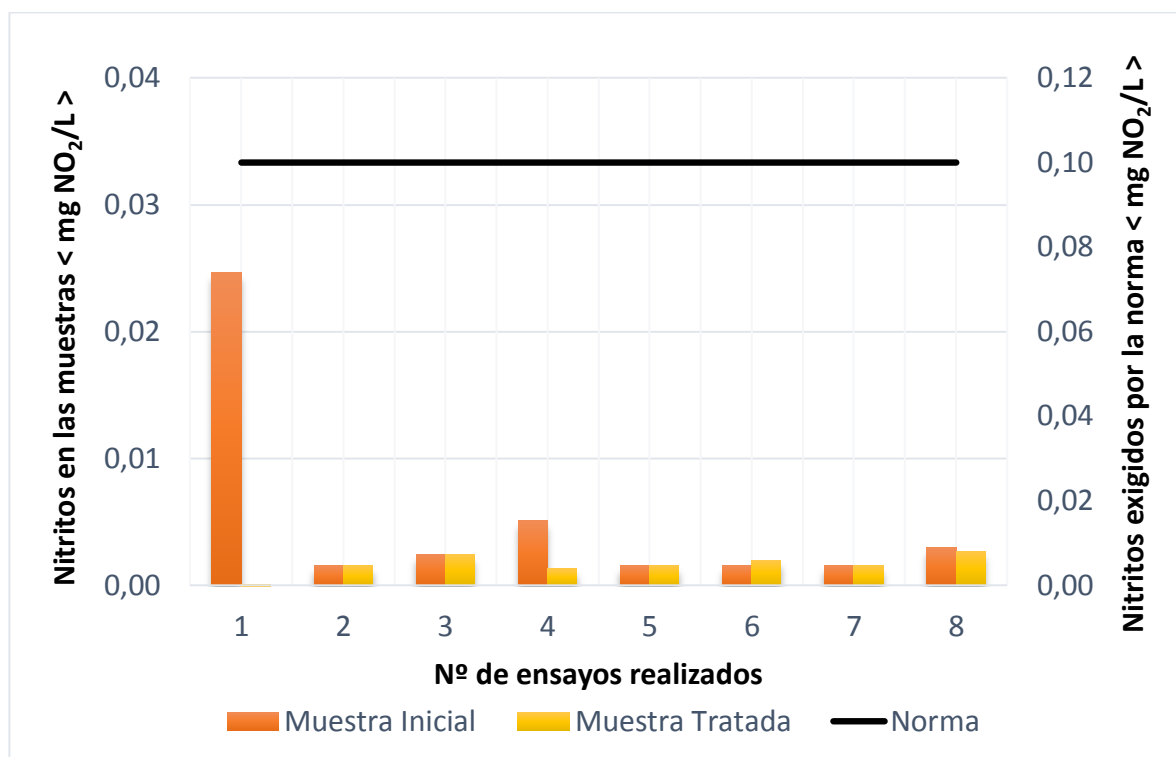
Características químicas

Cadmio y Plomo: Los valores máximos permisibles de cadmio y plomo para que no se produzcan efectos adversos sobre la salud humana son 0,003 mg/L y 0,01 mg/L respectivamente. En las muestras de agua analizadas no se encontró la presencia de estos elementos, por tanto, se considera no detectable.

Nitritos y Nitratos

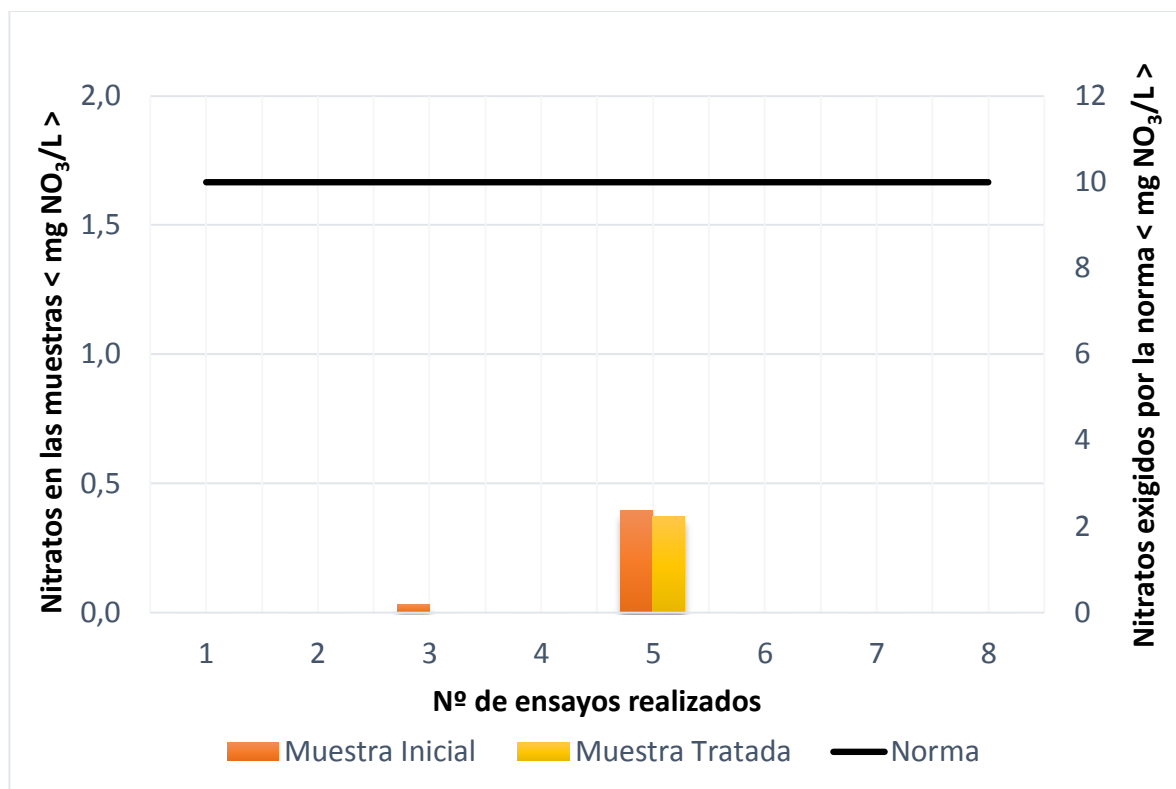
Dentro de las características químicas del agua para consumo humano que presentan implicaciones sobre la salud humana, se encuentran los nitritos y nitratos, que según la resolución 2115 de 2007, el valor máximo aceptable es 0,1 mg/L, expresado como NO_2^- y 10 mg/L expresados como NO_3^- ; en las gráficas 2 y 3 se observa el comportamiento de estos parámetros en las muestras de agua analizadas.

Gráfica 2. Resultados de nitritos en los ensayos de laboratorio realizados



Fuente: Autores

Gráfica 3. Resultados de nitratos en los ensayos de laboratorio realizados



Fuente: Autores

Como se observa en las gráficas 2 y 3 los valores obtenidos en cada uno de los respectivos análisis, no superan el límite permisible establecido por la norma y debido a que los nitritos se convierten de forma natural a nitratos, la concentración de estos últimos no fue detectable durante los ensayos de jarras realizados. Sin embargo, es importante llevar un control adecuado de estos parámetros, debido a que la presencia de nitritos en el agua puede producir metahemoglobinemia en las personas (Vargas, 2004).

Dentro de las características químicas del agua para consumo humano que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana, se encuentra el

calcio, magnesio, hierro total, zinc, alcalinidad total, acidez total, cloruros, dureza total, sulfatos. En las gráficas 4, 5, 6, 7 y 8 es posible visualizar el comportamiento de algunos de los parámetros mencionados anteriormente.

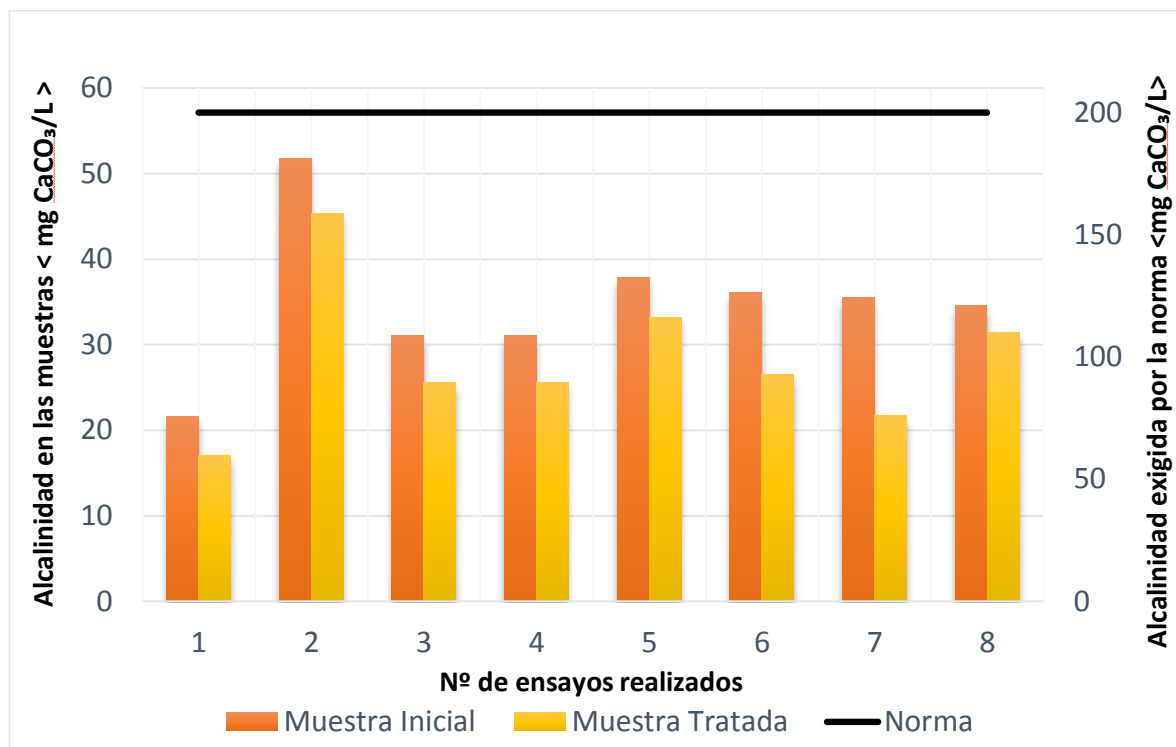
Calcio y Magnesio: el valor máximo aceptable es 60 mg/L y 36 mg/L respectivamente. En las muestras de agua analizadas los valores obtenidos se encontraron muy por debajo del límite establecido en la norma. Estos valores resultan acordes con la dureza obtenida ya que esta se ve relacionada directamente con la cantidad de calcio y magnesio presente en el agua (CONAGUA, 2007).

Hierro total: el valor máximo aceptable es 0,3 mg/L. En las muestras de agua analizadas en el laboratorio no se obtuvieron valores que sobrepasaran el límite permisible, observando una disminución de la concentración en el agua tratada con respecto al agua cruda, esto, debido a que el hierro es eliminado fácilmente por la acción del coagulante en el agua (Gray, 1994); aunque la OMS no propone ningún valor de referencia que pueda causar efectos sobre la salud, es común encontrar concentraciones altas de hierro en aguas subterráneas lo que puede ocasionar turbidez y coloración de la misma, afectando la calidad del agua (OMS, 2006).

Zinc: en las muestras de agua analizadas no se encontró la presencia de este elemento.

Alcalinidad total:

Grafica 4. Resultados de alcalinidad en los ensayos de laboratorio realizados

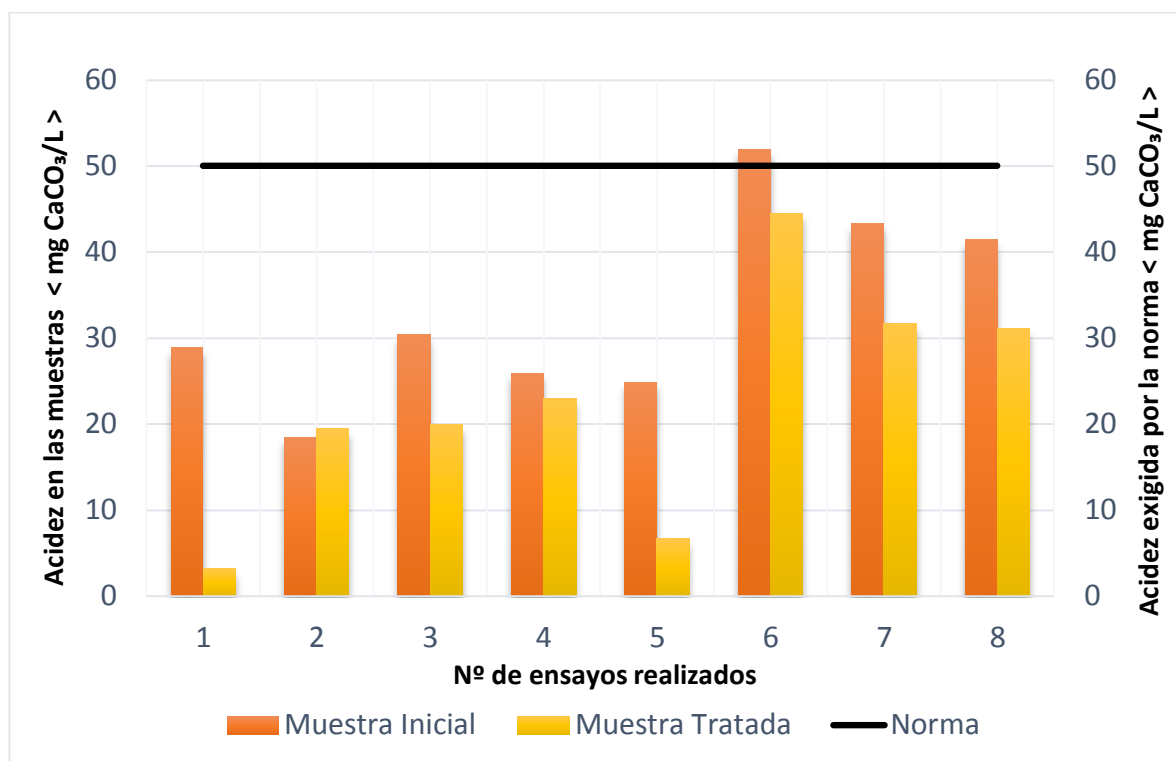


Fuente: Autores

El valor máximo aceptable es 200 mg/L de CaCO₃. En los análisis de las muestras de agua realizados se obtuvieron valores que no excedieron el límite permisible como se muestra en la gráfica 4; mantener un control adecuado de la alcalinidad es muy importante ya que dependiendo de esta pueden verse afectados significativamente otros parámetros y algunos procesos propios del sistema de potabilización (Vargas, 2004).

Acidez total:

Grafica 5. Resultados de acidez en los ensayos de laboratorio realizados

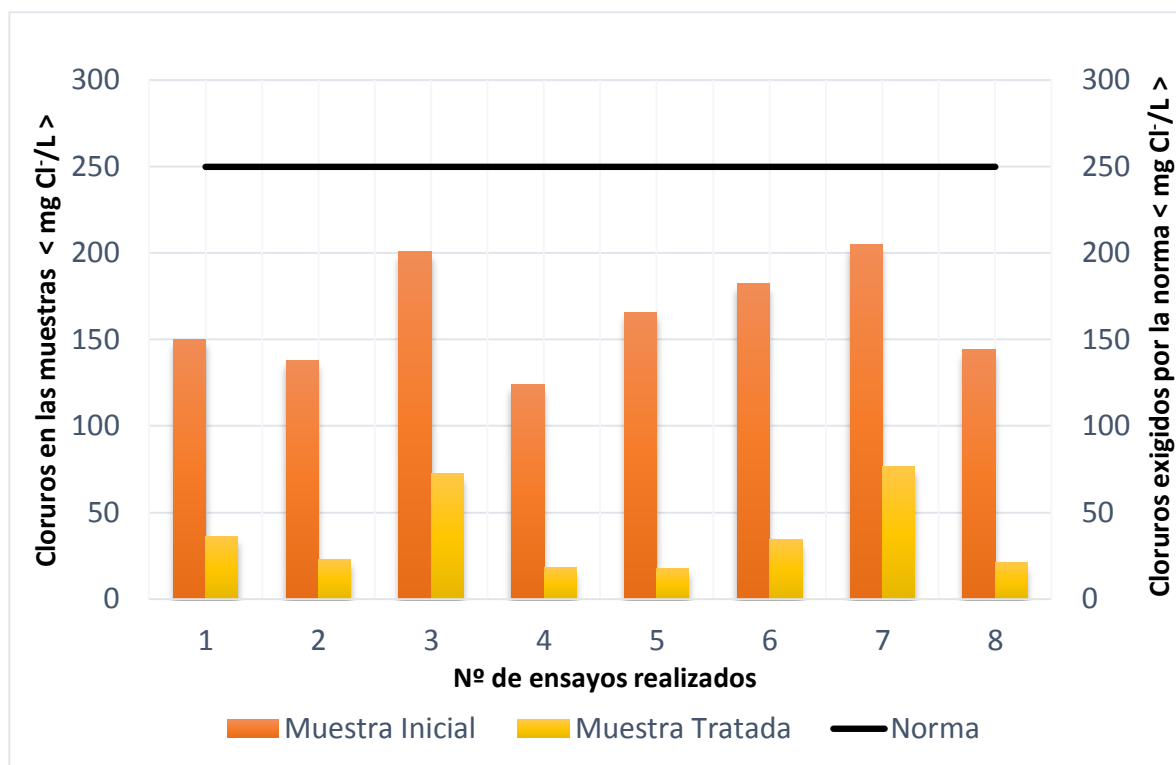


Fuente: Autores

Según el anterior Decreto 475 de 1998 referente a la calidad del agua potable, el valor máximo aceptable es 50 mg/L de CaCO₃. En las muestras de agua analizadas (muestra inicial y muestra tratada) los valores obtenidos a partir de la titulación con Hidróxido de Sodio (NaOH: 0,01N) no superaron el valor admisible para brindar un agua potable totalmente confiable; el valor máximo alcanzado una vez el agua se encuentra coagulada es: 44,50 mg/L.

Cloruros:

Grafica 6. Resultados de cloruros en los ensayos de laboratorio realizados

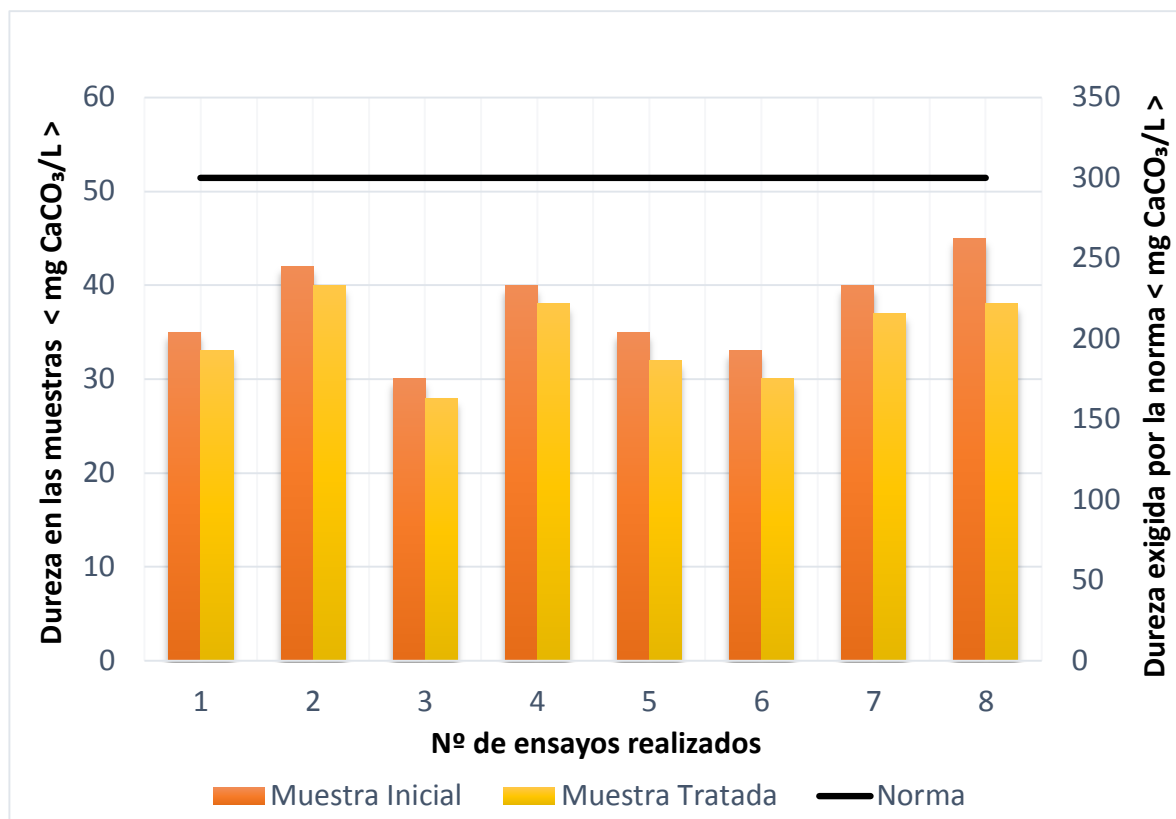


Fuente: Autores

El valor máximo aceptable es de 250 mg/L de Cl⁻. En las muestras de agua analizadas, como se observa en la gráfica, no se excedió el valor máximo aceptable según la normatividad. Sin embargo, es importante llevar un control de este parámetro, pues valores por encima de la concentración permitida, pueden conceder al agua un sabor perceptible y en concentraciones muy elevadas aumentan la velocidad de corrosión de los metales en los sistemas de distribución (Vargas, 2004).

Dureza total:

Grafica 7. Resultados de dureza total en los ensayos de laboratorio realizados



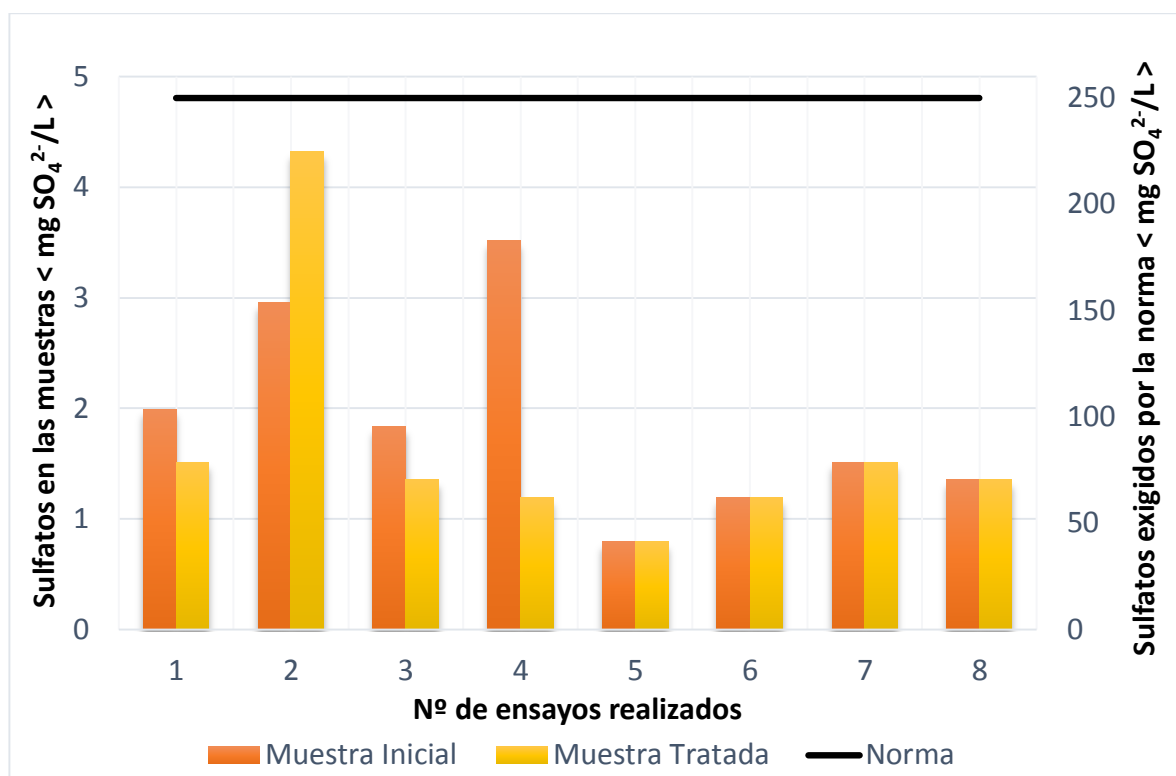
Fuente: Autores

La dureza del agua refleja la naturaleza de la geología del área la cual ha estado en contacto con el agua (Gray, 1994). El valor máximo aceptable es de 300 mg/L expresada en CaCO₃. Valores con menos de 75 mg/L se consideran aguas blandas y mayores a 300 mg/L aguas extremadamente duras. Los datos obtenidos de las muestras de agua analizadas indican un agua blanda y aunque no existe información precisa de umbrales que determinen los efectos en la salud que pueda provocar la presencia de dureza en el agua, en ocasiones, un agua dura puede estar relacionada con problemas cardiovasculares y un agua blanda puede llegar a producir diarrea.

Se recomienda mantener un agua con valores de dureza entre 100 y 200 mg/L, puesto que aguas con valores superiores a 200 mg/L, en función con la interacción de otros factores, como alcalinidad y pH, puede provocar incrustaciones, generalmente por donde circula agua caliente y aguas con valores inferiores a 100 mg/L, pueden llegar a ser corrosivas para las tuberías. Por tanto, para aumentar un poco la dureza del agua se recomienda adicionar cal apagada, lo que simultáneamente incrementa la alcalinidad (CONAGUA, 2007).

Sulfatos:

Grafica 8. Resultados de sulfatos en los ensayos de laboratorio realizados

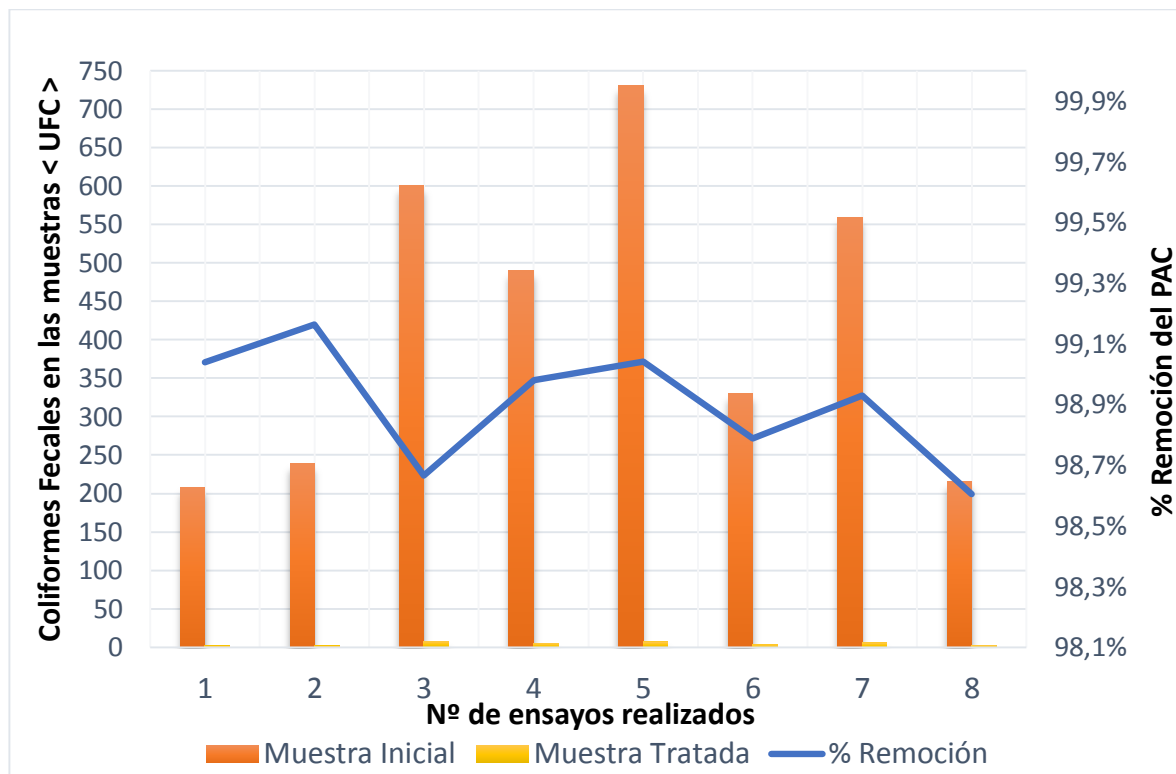


Fuente: Autores

El valor máximo aceptable es 250 mg/L de SO_4^{2-} . Siendo que los sulfatos se producen de forma natural en las aguas subterráneas, su presencia en las muestras de agua analizadas es significativamente baja comparada con la norma. Aunque se considera no muy toxico, elevadas concentraciones de sulfato pueden llegar a provocar problemas gastrointestinales (OMS, 2006).

Características microbiológicas

Grafica 9. Resultados de Coliformes fecales en los ensayos de laboratorio realizados



Fuente: Autores

La técnica utilizada para la determinación de *Escherichia coli* fue filtración por membrana. En la gráfica 9 se observa la cantidad de colonias expresada en UFC

(unidades formadoras de colonias) presentes en las muestras de agua cruda y la cantidad de colonias una vez el agua ha pasado por los procesos de coagulación y floculación con su respectivo porcentaje de remoción en cada uno de los casos; si bien no se obtuvo un porcentaje de remoción del 100% como lo establece la norma (0 UFC/100m³), fue posible alcanzar un máximo de 99,163%, correspondiendo este valor únicamente a los ensayos iniciales de tratamiento cuando fue adicionado y mezclado el coagulante. En el proceso de desinfección a partir de la adición de hipoclorito de sodio fue posible eliminar las bacterias en su totalidad.

8.2 DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO AMONICAL

La cloración es uno de los métodos más comunes usado para la desinfección del agua cruda. En la cloración, las reacciones del cloro con amonio y compuestos orgánicos Nitrogenados – N, forman cloraminas y organocloraminas que pueden afectar las dosis de cloro requerida (Raymond & Lettaman, 2002). Teniendo en cuenta esto, se realizó la determinación de Nitrógeno amoniacal a partir de la titulación con HCl, para analizar las reacciones que se presentan cuando se le adiciona cloro al agua y los posibles efectos en el proceso de desinfección. La localización del punto de quiebre en la gráfica de demanda de cloro, para la determinación de la dosis optima de desinfección, va depender de la cantidad de amoníaco presente en el agua tratada. Los resultados obtenidos de las muestras de agua analizadas indican la presencia de nitrógeno amoniacal, es decir, que en el proceso de desinfección, instantes después de que es adicionado el cloro al agua, se va a producir una reacción con cloro, provocando la formación de cloraminas y organocloraminas, en donde se espera más adelante sean oxidadas completamente por el cloro y se presente el fenómeno de punto de quiebre.

8.3 ÍNDICE DE RIESGO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO (IRCA)

Con el fin de garantizar la calidad del agua que va a ser suministrada a los habitantes de la Granja, se determinó el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA), este índice fue presentado dentro de la Resolución 2115 de 2007 para hacer seguimiento a la calidad del agua teniendo en cuenta el promedio de los resultados obtenidos en el laboratorio de las características químicas, físicas y microbiológicas del agua tratada y el puntaje de riesgo contemplado en la tabla 6 para cada una de estas.

Tabla 6. Puntaje de riesgo de cada parámetro medido.

Característica	Puntaje de riesgo
Color Aparente	6
Turbiedad	15
pH	1,5
Color residual libre	15
Alcalinidad Total	1
Calcio	1
Fosfatos	1
Manganeso	1
Molibdeno	1
Magnesio	1
Zinc	1
Dureza total	1
Sulfatos	1
Hierro Total	1,5
Cloruros	1
Nitratos	1
Nitritos	3
Aluminio (Al+3)	3
Fluoruros	1
COT	3
Coliformes Totales	15
Escherichia Coli	25
Sumatoria de puntajes asignados	100

Fuente: Resolución 2115 de 2007.

Teniendo en cuenta el **anexo F**, Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA), se estableció que el % de clasificación del IRCA de las muestras de agua tratadas es de **0%**.

Una vez obtenido el % de clasificación del IRCA se determinó a partir de la siguiente tabla el nivel de riesgo que se podría presentar cuando se consume agua en condiciones inadecuadas.

Tabla 7. Clasificación del nivel de riesgo en salud según el IRCA por muestra y el IRCA mensual y las acciones que deben adelantarse.

Clasificación IRCA (%)	Nivel de Riesgo	IRCA por muestra (Notificaciones que adelantará la autoridad sanitaria de manera inmediata)	IRCA mensual (Acciones)
80.1 -100	INVIABLE SANITARIA MENTE	Informar a la persona prestadora, al COVE, Alcalde, Gobernador, SSPD, MPS, INS, MAVDT, Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entidades del orden nacional.
35.1 - 80	ALTO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde, Gobernador y a la SSPD.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora y de los alcaldes y gobernadores respectivos.
14.1 – 35	MEDIO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde y Gobernador.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5.1 - 14	BAJO	Informar a la persona prestadora y al COVE.	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0 - 5	SIN RIESGO	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.

Fuente: Resolución 2115 de 2007.

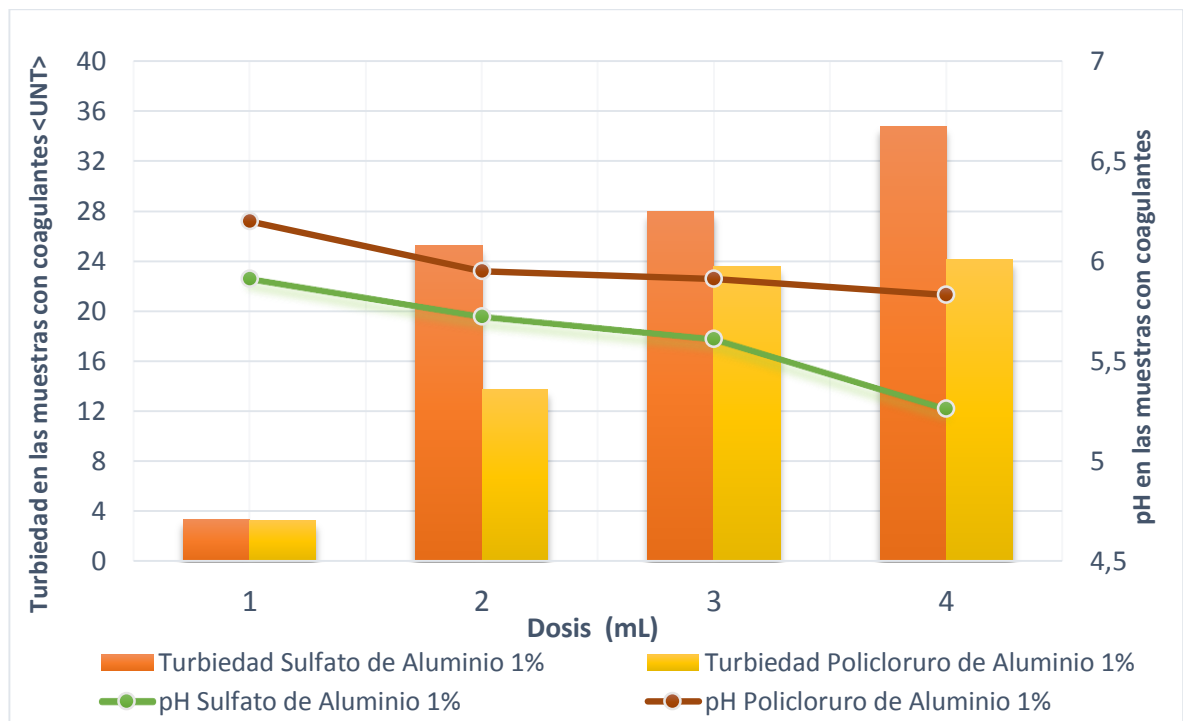
De acuerdo con la tabla 7, las muestras de agua analizadas no presentan ningún tipo de riesgo; lo que quiere decir, que es apta para consumo humano y para evitar que se eleven las concentraciones de cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas y sobrepasen los valores máximos aceptables, se debe llevar un control adecuado de las mismas, facilitando además, los procesos que componen el sistema compacto de potabilización.

En el **anexo F** se resume los cálculos realizados para la determinación del IRCA.

8.4 ENSAYOS DE TRATABILIDAD PARA LA DETERMINACIÓN DEL COAGULANTE ADECUADO

Se realizaron ensayos de jarras para determinar qué tipo de coagulante era el que más se adecuaba a las características del agua cruda.

Grafica 10. Resultados de la determinación del coagulante óptimo en los ensayos de laboratorio realizado



Fuente: Autores

La selección del coagulante se determinó teniendo en cuenta el comportamiento del policloruro de aluminio (PAC) y el sulfato de aluminio en relación con la turbiedad, el pH, el tamaño de los flocs formados y el tiempo de sedimentación a diferentes dosis (Maldonado & Nova, 2012). Como se observa en la gráfica 10, los ensayos realizados con PAC demostraron una mayor reducción de turbiedad; también una estabilización del pH acercándolo hacia el valor óptimo (6,5 – 9), mientras que el sulfato de aluminio generó la acidificación en la muestra tratada, debido al elevado

consumo de alcalinidad que requiere este coagulante para su adecuado funcionamiento. De acuerdo a lo anterior, se decide utilizar el PAC en el **anexo G** se muestra la ficha técnica del PAC granular) como el coagulante ideal para potabilizar el agua, demostrando adicionalmente en las pruebas de laboratorio realizadas que este tipo de coagulante no presentó efectos nocivos sobre la calidad física, química y microbiológica del agua tratada, además, este tipo de coagulante es recomendado para aguas blandas.

8.5 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL COAGULANTE

En el proceso de coagulación, la dosis óptima varía en función del pH y de la concentración de coloides presente en el agua cruda. En dosis menores que la óptima no se desestabilizan los coloides y con dosis mayores, se pueden llegar a reestabilizar, lo que deteriora la calidad del agua (Vargas, 2004).

En los ensayos de jarras realizados se determinó que el volumen óptimo de dosificación del PAC variaba entre 0,75 – 1,0 mL a una concentración del 1%. Teniendo en cuenta este volumen de dosificación, fue posible determinar la dosis óptima del coagulante. Es decir, se seleccionó la dosis que produjo la más rápida desestabilización de las partículas coloidales (disminución de la turbiedad), la que logró estabilizar el pH (según valor máximo aceptable) y la que permitió la formación del floculo más grande, denso y compacto.

La dosis óptima de coagulación se determinó de la siguiente manera:

$$Dosis\ óptima\ de\ coagulación = \frac{V_{PAC} * C_{PAC}}{V_m} = < mg/L >$$

Donde, V_{PAC} corresponde al volumen óptimo de dosificación del PAC en <mL>, C_{PAC} es la concentración del PAC en <mg/L> Y V_m es el volumen de agua cruda tomada en <mL>.

Como se mencionó anteriormente, el volumen de PAC seleccionado se encuentra entre 0,75 – 1,0 mL, la concentración del PAC que es del 1% corresponde a 10000 mg/L y el volumen de agua cruda tomada para cada jarra fue de 500 mL. Reemplazando los valores en la ecuación,

$$\text{Dosis óptima del coagulante} = \frac{0,75 \text{ mL} * 10000 \text{ mg/L}}{500 \text{ mL}} = 15 \text{ mg/L}$$

$$\text{Dosis óptima del coagulante} = \frac{1,0 \text{ mL} * 10000 \text{ mg/L}}{500 \text{ mL}} = 20 \text{ mg/L}$$

Se obtiene que la dosis optima de coagulante requerida para un buen proceso de coagulación varía entre 15 – 20 mg/L, esto quiere decir, que por cada Litro de agua cruda a tratar se requieren entre 15 – 20 mg de coagulante (PAC). Como este se aplica en solución se debe adicionar a una concentración del 1% en masa.

Es importante aclarar, que la dosis óptima del coagulante varía dependiendo de la composición del agua cruda, por esto razón, se requiere realizar ensayos de jarras periódicos que permitan determinar la dosis óptima de coagulante y así realizar un proceso de coagulación eficaz.

El **anexo J** en “Coagulador helicoidal” contiene los cálculos de la determinación del caudal de dosificación del PAC teniendo en cuenta el caudal máximo diario.

8.6 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE DESINFECCIÓN

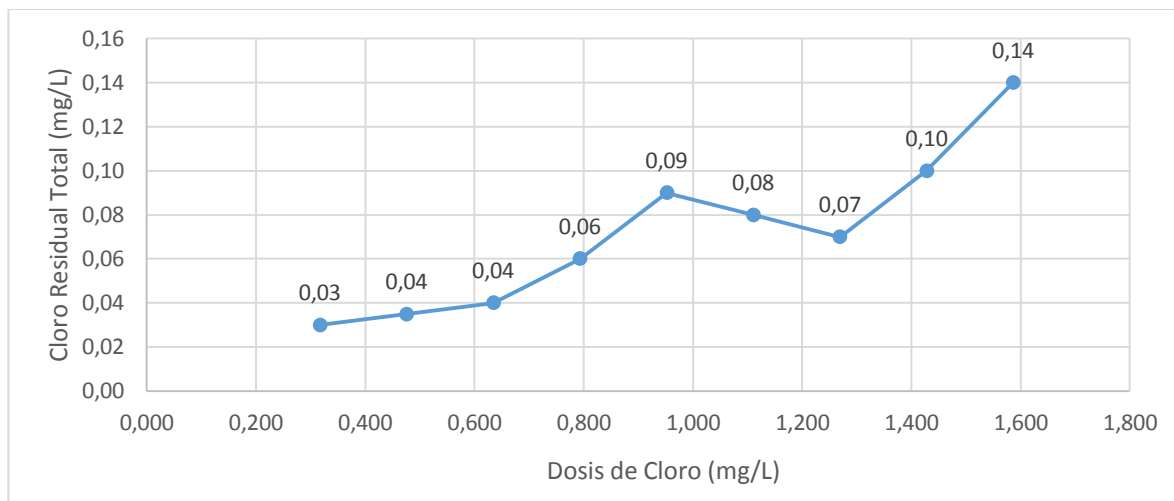
Se seleccionó el método de cloración como el indicado para realizar un proceso de desinfección eficiente, teniendo en cuenta que el cloro es de los desinfectantes más utilizados porque es eficaz a una baja concentración y forma un residual si se aplica en dosis suficiente. Estas son algunas de las ventajas de utilización de este método:

- Destruye los organismos patógenos del agua en condiciones ambientales y en un tiempo corto.
- Es de fácil aplicación, manejo sencillo y bajo costo.
- La determinación de su concentración en el agua es sencilla y de bajo costo.
- En las dosis utilizadas en la desinfección de las aguas, no constituye riesgo para el hombre ni para los animales.
- Deja un efecto residual que protege el agua de una posterior contaminación en la red de distribución (Vargas, 2004).

Es indispensable resaltarla importancia del tiempo de contacto en el proceso de desinfección. En la cloración, el aumento del tiempo del contacto no solo genera una mayor destrucción de microorganismos, sino también, provoca un aumento de la demanda de cloro (Reynolds & Richards, 1996).

Para determinar la dosis de desinfección apropiada, se realizaron curvas de demanda de cloro a partir de los ensayos realizados en el laboratorio. El tipo de desinfectante utilizado fue el Hipoclorito de sodio (NaClO), en el **anexo H** se muestran la ficha técnica del desinfectante. A continuación se presenta una de las gráficas de demanda de cloro realizadas, en función de la dosis de cloro suministrada a la muestra de agua tratada y el cloro residual, obtenido por medio del método espectrofotométrico.

Grafica 11. Determinación del Punto de Quiebre para la muestra de agua N°1



Fuente: Autores

En la gráfica 11 se observa, que al agregarle NaClO al agua, este no reacciona inmediatamente, es decir, no se presenta cloro residual, debido a que el NaClO reacciona inicialmente con los agentes reductores presentes en ella. Una vez satisfecha la demanda por los agentes reductores, este reacciona con todo el amoníaco y cloraminas orgánicas presentes, y es cuando comienza a aparecer el cloro residual combinado (determinada cantidad de cloro en el agua de tal forma que se produzca amoníaco), el cual comienza a ascender alcanzando un valor máximo; posteriormente comienza a descender, a causa de la formación de productos volátiles, hasta un punto de mínimo cloro residual, que se presenta, una vez el amoníaco y las cloraminas han reaccionado con el cloro, es decir, han sido oxidados completamente por el cloro, reduciendo así el cloro residual formado dando paso a la producción de cloro residual libre. Siendo este, el que determinó el “Punto de Quiebre”.

Las gráficas que se muestran en el **anexo I** representan que la dosis de NaClO óptima para que se presente el punto de quiebre, es decir, se genere un cloro residual libre, varía entre 1,2 – 1,4 mg NaClO /L. El RAS 2000-Título C, recomienda

que la concentración de cloro residual libre en el sistema de distribución debe estar entre 0,2 – 1,0 mg/L. Por tanto, para cumplir con esta restricción, la dosis optima de desinfección deberá ser de 2,5 mg NaClO /L.

En el **anexo I** se encuentran las gráficas de demanda de cloro para cada una de las muestras de agua tratada, así como los cálculos de la concentración de NaClO suministrada y la dosis obtenida para cada volumen de agua tratada.

8.7 DATOS BÁSICOS Y DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

Capacidad de diseño

El tamaño del sistema compacto de potabilización depende en gran medida del caudal necesario para abastecer la demanda poblacional en la Granja La Fortaleza. Tomando como base una población flotante de 155 personas, un consumo diario de agua por cada persona de 100 L/hab*día y unas pérdidas del 24% se obtuvo un caudal medio diario (Qmd) de 20380,43 L/d; con el fin de asegurar una capacidad mayor al Qmd se determinó el caudal máximo diario (QMD); obteniendo como resultado 26494,56 L/d, esto quiere decir, que la planta diseñada cuenta con una capacidad de tratamiento de agua cruda igual al QMD, de tal forma que puede surtir agua a toda la población dentro de los siguientes 15 años (nivel de complejidad bajo) sin ningún problema.

En el **anexo J** se encuentra la memoria de cálculo que explica los resultados de los valores mencionados anteriormente.

Tipo de sistema

El sistema es de tipo compacto. Es una unidad que incluye los procesos de coagulación, floculación y sedimentación en un solo modulo; seguido de los procesos de filtración y desinfección que se realizan en micromódulos. Es decir, que en el sistema el agua es sometida a todos los procesos y operaciones unitarias que componen la potabilización del agua, como son Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración y Desinfección.

La mayor parte del funcionamiento de la planta es de tipo hidráulico pero también requiere de sistemas electromecánicos para bombear el agua desde el pozo de succión hasta un tanque de almacenamiento.

Calidad del agua a tratar

Este sistema está diseñado de forma efectiva y confiable, de manera que permite obtener un agua tratada de manera estable, con valores de turbiedad < 2 NTU, pH estable y una eliminación efectiva de Coliformes fecales, es decir, el sistema garantiza que el agua tratada no se superen los valores máximos permisibles para agua potable según la Resolución 2115 de 2007.

Procesos de la planta

Para garantizar que el QMD sea tratado, el agua cruda es transportada por medio de una bomba centrífuga trifásica de 7,5 hp desde el pozo de succión hasta un tanque de almacenamiento que tiene un volumen de 30 m³.

El tratamiento del agua inicia cuando el agua cruda es transportada desde un tanque de almacenamiento hasta un equipo de mezcla rápida de tipo hidrociclón, de

funcionamiento totalmente hidráulico, donde, por medio de una tubería de 1 ½", es adicionado el agente coagulante en forma líquida proveniente de una (1) bomba dosificadora de químicos. La agitación, mezcla y disolución total del coagulante en el agua cruda se lleva a cabo según el diseño del equipo de mezcla rápida y la velocidad con que el agua ingresa al mezclador.

Se aplican dos (2) productos químicos para la adecuada tratabilidad del agua cruda, el primero es el policloruro de aluminio (PAC) dosificado a una concentración en masa del 1% por medio de una bomba dosificadora de químicos con una presión de 116 PSI y el segundo dosificado también por medio de una bomba dosificadora de químico con una presión de 101, 5 PSI es el Hipoclorito de Sodio (NaClO) que es ampliamente usado para la desinfección del agua, se encarga de eliminar todas las bacterias, virus y microorganismos presentes en ella, contribuyendo también a la oxidación del hierro, manganeso y demás sustancias orgánicas presentes en el agua.

Una vez se cumple el proceso de mezcla rápida (coagulación) el agua desciende por un tubo vertical de diámetro de 2,5" con un gradiente cercano a 1500 s^{-1} hacia el fondo del floculador para dar inicio al proceso de floculación, el cual se desarrolla en un tanque cilíndrico (flujo helicoidal) y está diseñado para generar una disminución de gradiente en forma variable continua justo en el momento cuando se da el intercambio de diámetros. El proceso se lleva a cabo a medida que el tanque se va llenando lentamente. El diseño del tanque permite que la velocidad del agua disminuya continuamente a medida que el agua asciende, permitiendo obtener gradientes bajos cercanos a $3,5 \text{ s}^{-1}$ cuando llega a la zona de volumen constante.

El agua completamente floculada, es decir con todos los coloides ya agrupados en partículas de mayor tamaño y peso (flóculos) ascenderá a una velocidad de 0,004 m/s, de tal forma que impida que las partículas formadas salgan del sistema. En el proceso de sedimentación, se busca que las flóculos formados en la etapa de

floculación se precipiten hacia el fondo por su propio peso y arrastren las partículas de menor tamaño que están ascendiendo, esto se logra a partir de la instalación de un sistema de paneles hexagonales inclinados a 60° que harán que el flujo del agua sea laminar y que los flocs formados pierdan energía al chocar suavemente contra los paneles inclinados y decanten al fondo del tanque en forma de lodos. El fondo de la planta, está diseñado en forma de tolva de tal manera que permita que los lodos almacenados puedan ser extraídos diariamente, esto, dependiendo de la turbidez del agua cruda.

Finalmente el agua clarificada, desciende por medio de una tubería PVC de diámetro de $1\frac{1}{2}$ " hacia las unidades de filtración, el cual consta de dos (2) filtros con un área de $0,22\text{ m}^2$ cada uno y se encuentran ubicados del tanque de mayor diámetro de la planta. Estos son los encargados de la retención de partículas finas en suspensión que lograron pasar con el agua clarificada. Esta etapa se logra cuando el agua atraviesa un lecho filtrante de 60 cm de arena. Cuando el agua atraviesa el lecho filtrante es conducida hacia el tanque de desinfección, en el cual será adicionada una dosis de 2,5 mg de NaClO por cada litro de agua tratada y finalmente almacenada en tres (3) tanques de 30000 L cada uno para satisfacer la demanda de agua durante 3 días.

Sistema de dosificación de insumos químicos para la potabilización del agua

El sistema de dosificación de los productos químicos, constituye el eje central de los procesos de coagulación y desinfección, esta dosificación va a ser realizada directamente a la tubería que lleva el agua hasta el sistema de coagulación y hasta el tanque de desinfección respectivamente, esta dosificación será realizada por medio de bombas peristálticas, este tipo de bombas permite realizar una dosificación bastante precisa, las partes que constituyen este tipo de bombas

dosificadoras son resistentes al ataque de sustancias corrosivas, asegurando la durabilidad del sistema de dosificación.

El sistema de dosificación de la planta consta de dos (2) bombas eléctricas dosificadoras de químicos, utilizadas para dosificar el coagulante y el hipoclorito de sodio, las características de estas son las que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8. Características de las bombas dosificadoras

Características de las bombas dosificadoras	
Bomba Dosificadora PAC	
Marca	HANNA Instruments
Modelo	Blackstone BL
Referencia	BL 3
Caudal máximo (LPH)	2,9
Presión (PSI)	116
Impulsión	120
Bomba Dosificadora NaClO	
Marca	HANNA Instruments
Modelo	Blackstone BL
Referencia	BL 5
Caudal máximo (LPH)	5
Presión (PSI)	101,5
Impulsión	120

Fuente: Autores. Información suministrada por HANNA Instruments

Base de cálculo del sistema de potabilización

Tabla 9. Especificaciones técnicas de la planta compacta

Capacidad de la planta	$26,50 \frac{m^3}{d}$
Tiempo de retención total	1 hora y 30 minutos

Fuente de agua	Recurso hídrico existente en la zona de estudio
Tipo de planta	Planta de potabilización compacta
Tecnología empleada	Convencional
Tipo de Flujo	Doble flujo ascendente y flujo descendente
Operaciones ejecutadas	Coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección
Material de Fabricación	Resina de Poliéster grado Agua Potable
Proceso de retro lavado	No requiere
Proceso de dosificación	Completamente automático
Volumen efectivo de la Planta	Incluye el tanque cilíndrico
Fluido en contacto	Agua cruda subterránea
Temperatura	Ambiente
Presión de operación	Atmosférica
Forma geométrica	Cilíndrica
Altura aproximada	4,5 m
Fondo	Tolva
Almacenamiento interno temporal	Tres tanques de 30 m ³

Fuente: Autores

Dimensiones del sistema

A continuación se presentan las dimensiones del sistema compacto de potabilización de agua diseñado para el suministro de agua potable en la Granja La Fortaleza:

Potencia de la bomba

Cálculo de la potencia de la bomba	
Potencia de la bomba mínima (P) <hp>	4,73

Teniendo en cuenta que la potencia mínima de la bomba para suministrar una caudal de 26,5 m³/d es de 4,73 hp se decide seleccionar una bomba centrífuga trifásica de 7,5 hp, que presenta las siguientes características:

Tabla 10. Característica de la bomba de succión

Sistema de Bombeo	
Modelo	HE 1.5 75-3
Referencia	1E0536
Potencia (HP)	7,5
Fases	Trifásico
Amperaje 220 V	25,3
Amperaje 440 V	12,6
Diámetro de Succión	2"
Diámetro de Descarga	1 1/2"
Altura máxima (m)	64
Caudal máximo (GPM)	164

Fuente: BARNES DE COLOMBIA S.A

Tanque de dosificación del PAC

Tanque de almacenamiento PAC	
Volumen del tanque mínimo (ϑ) <m ³ >	0,040

El tanque para la dosificación del PAC es un tanque de 40 L de las dimensiones comerciales suministrada por la empresa Rotoplas.

Hidrociclón

Hidrociclón	
Diámetro Tubo Lateral (D_l) <m>	0,038
Radio Superior Hidrociclón (R_H) <m>	0,064
Radio Inferior Hidrociclón (r_H) <m>	0,032
Altura Hidrociclón (H_{ct}) <m>	0,400
Volumen Hidrociclón (ϑ_{ct}) <m ³ >	0,003

Coagulador helicoidal

Coagulador helicoidal	
Altura mínima del coagulador (H_c) <m>	4,378
Volumen del coagulador (ϑ) <m ³ >	0,014
Diámetro del coagulador (\varnothing_c) <m>	0,064

Floculador helicoidal

Floculador helicoidal	
Altura del Total floculador (H_f) <m>	3,223
Volumen del floculador (ϑ) <m ³ >	0,276
Diámetro del floculador (\varnothing_c) <m>	0,330

Sedimentador de Alta Tasa

Sedimentador de Alta Tasa	
Altura de Sedimentación (H_s) <m>	1,155
Volumen del Sedimentador (ϑ) <m ³ >	0,276
Diámetro del Sedimentador (\varnothing_s) <m>	0,330
Geometría del Conducto	Hexagonal
Longitud de cada conducto (l) <m>	1,000
Separación (d) <m>	0,025
Espesor (e) <mm>	1,000
# Conductos (N_c) <>	40,000

Sistema de recolección de Lodos

Recolección de Lodos	
Altura Cono truncado (H_{ct}) <m>	1,700
Volumen Cono Truncado (θ_{ct}) <m ³ >	0,135
Radio Superior Cono truncado (R_{ct}) <m>	0,165
Radio Inferior Cono truncado (r_{ct}) <m>	0,152

Filtros rápidos

Filtros Rápidos	
Profundidad del filtro (P_f) <m>	1,0362
Número de filtros <>	2,0000
Área del filtro (A_f) <m ² >	0,2208
Ancho (B) <m>	0,4699
Largo (L) <m>	0,4699
Profundidad máxima del agua en la canaleta (h) <m>	0, 125
Ancho de la canaleta (b) <m>	0, 125

Todos los cálculos del diseño se realizaron para un solo filtro; sin embargo, el sistema contará con dos (2) filtros para su funcionamiento, debido a los procesos de lavado y mantenimiento requeridos en el proceso. También se busca prolongar la vida útil de los lechos filtrantes.

Pérdidas totales del sistema

Pérdidas totales del sistema	
Pérdidas Totales impulsión (h_{fi}) <m>	18,654
Pérdidas Totales succión (h_{fs}) <m>	0,370
Pérdidas Totales Coagulación (h_t) <m>	10,288
Pérdidas Totales Floculación (h_f) <m>	0,001
Pérdidas totales Sedimentador (h_s) <m>	0,058
Pérdidas Totales Filtros (h) <m>	0,465
Pérdidas totales Sistema (h_{Ts}) <m>	29,836

Tanque de desinfección

Tanque de Desinfección	
Volumen del tanque de desinfección (θ) m^3	0,500

El tanque de desinfección será un tanque de 500 L de dimensiones comerciales suministradas por la empresa Rotoplas.

Tanques para el almacenamiento del agua tratada

Tanques de almacenamiento	
Numero de tanques (N_T) \times	3
Volumen del Tanque mínimo (θ) m^3	26,5

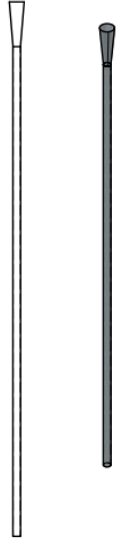
Para almacenar agua durante un periodo aproximado de tres (3) días, se requieren tres (3) tanques de almacenamiento con un volumen mínimo de $26,5 \text{ m}^3$; se recomienda adquirir tanques con una capacidad de 30 m^3 . Las dimensiones son las comerciales suministradas por la empresa Rotoplas.

El **anexo J** contiene las memorias de cálculo del diseño de cada uno de los procesos que hacen parte del sistema compacto de potabilización.

Especificaciones técnicas de la planta

En las siguientes tablas se podrá encontrar un resumen con las características más importantes de cada uno de los módulos que componen la planta compacta.

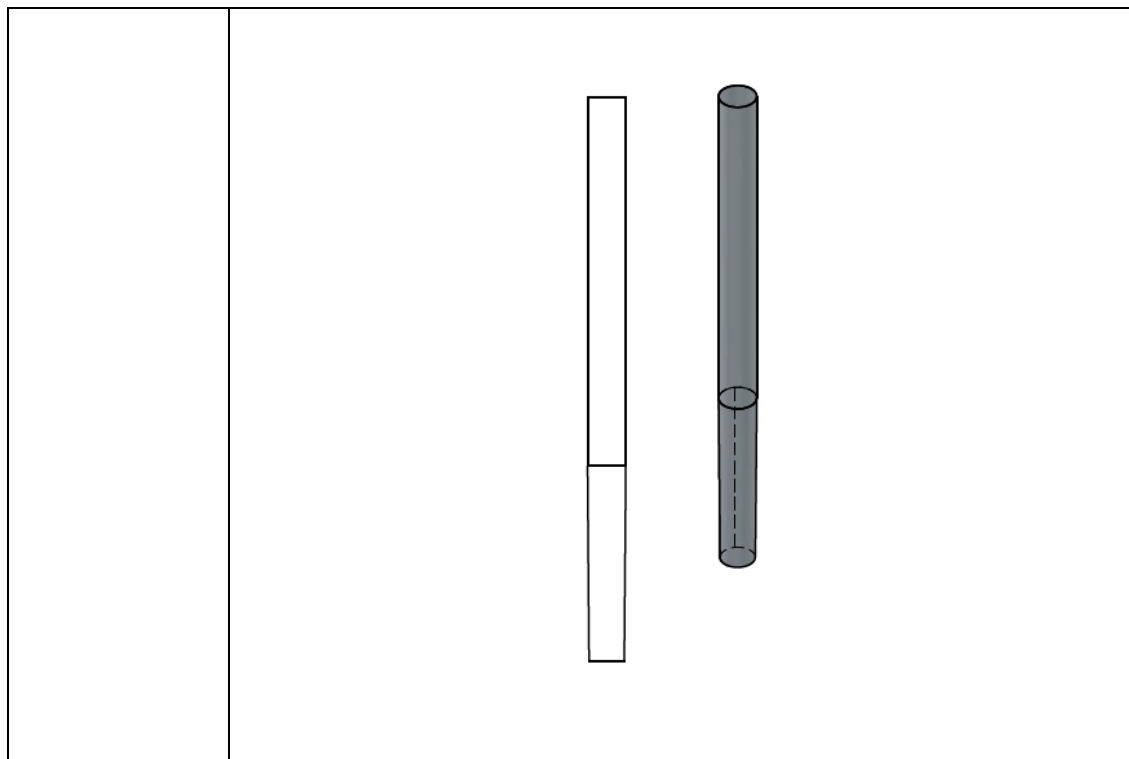
Tabla 11. Equipo de mezcla rápida (coagulación)

Ventajas	<p>La disponibilidad de energía no es un limitante para una correcta operación.</p> <p>Los costos de mantenimiento y operación son mínimos.</p>		
Condiciones de operación	<p>Se debe controlar el flujo a la entrada del Hidrociclón para evitar reboses.</p> <p>Se debe verificar la correcta adición del agente coagulante en la zona de mezcla.</p>		
Material de fabricación	<p>Se recomienda en fibra de vidrio poliéster reforzado, instalado dentro del tanque cilíndrico que conforma el floculador, incluye:</p> <p>Cuerpo cilíndrico con anillos internos helicoidales, entrada tangencial (2,5") soportado en el centro del floculador, altura del coagulador de 4,38 m.</p>		
Condiciones de diseño	Parámetro	Rango	Valor obtenido
	Gradiente de velocidad	1000 – 2000 s ⁻¹	1497,5 s ⁻¹
	Tiempo de retención	30 – 90 s	45 s
Esquema	 <p>El diagrama muestra un eje vertical centralizado dentro de un cilindro. A lo largo del eje, hay dos anillos helicoidales (en forma de espiral) que se extienden radialmente hacia las paredes del cilindro. El eje tiene una punta superior y una base inferior.</p>		

Fuente: Autores

Tabla 12. Equipo de mezcla lenta (floculador)

Ventajas	<p>Es totalmente hidráulico, no requiere el uso de energía eléctrica.</p> <p>El gradiente de velocidad es controlado a partir de la expansión del diámetro del floculador.</p>		
Condiciones de operación	<p>Mantener el caudal de diseño debido a que éste es proporcional a la velocidad, para un correcto funcionamiento de la fase.</p> <p>Verificar la formación del floc en el primer tercio de la zona de floculación.</p> <p>Evitar el rompimiento del floc a la entrada de los sedimentadores.</p>		
Material de fabricación	<p>Se recomienda en <u>fibra de vidrio poliéster reforzado</u>, constituye el cuerpo principal de la planta compacta, incluye:</p> <p>Cuerpo cilíndrico con anillos internos helicoidales y entrada axial (13"). Tolla para almacenamiento de lodos conformada por un cuerpo cónico y salida axial (2") para evacuación de lodos, diámetro del fondo del cuerpo cónico (6"), la altura de la zona de floculación es de 3,25 metros.</p>		
Condiciones de diseño	Parámetro	Rango	Valor obtenido
	Gradiente de velocidad	20 - 100 s ⁻¹	3,56 s ⁻¹
	Tiempo de retención	15 – 30 min	15 min
Esquema			



Fuente: Autores

Tabla 13. Sedimentador de alta tasa de flujo laminar

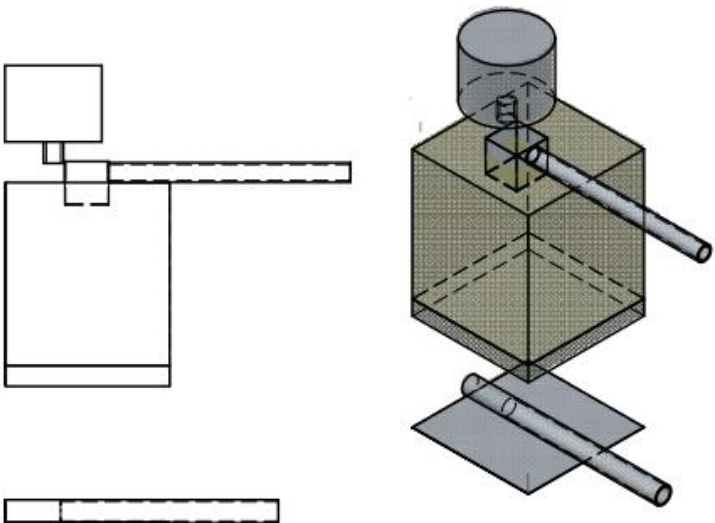
Ventajas	<p>Requiere menor área con mayor eficiencia, debido a las relaciones geométricas utilizadas.</p> <p>El medio plástico cuenta con mayor vida útil y mejores condiciones de operación.</p>
Condiciones de operación	<p>Retirar los lodos del sistema de manera periódica con el fin de evitar la alteración de las características fisicoquímicas del agua.</p> <p>Realizar una limpieza periódica de los sedimentadores como parte del mantenimiento preventivo de la estructura.</p>
Material de fabricación	<p>Instalado dentro del floculador y compuesto por módulos en forma de paneles hexagonales plásticos tipo colmena, con una inclinación de 60°. Ubicado inmediatamente después de la zona de floculación y con una altura de 1.15 metros.</p>

Condiciones de diseño	Parámetro	Rango	Valor obtenido
	Carga superficial	120 - 200 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$	309,39 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$
	Tiempo de retención	10 – 30 min	15 min
Esquema			

Fuente: Autores

Tabla 14. Sistema de filtración (filtros rápidos)

Ventajas	Requieren de una menor área debido a la tasa de filtración usada; motivo por el cual las actividades de operación y mantenimiento se realizan con una menor complejidad.
Condiciones de operación	<p>Supervisar los periodos de filtración y lavado del filtro; con esto se evita que la pérdida de carga sobrepase las condiciones normales y afecte la calidad del agua tratada.</p> <p>Cambiar el material filtrante cuando acabe su vida útil; teniendo en cuenta las características del agua tratada.</p>

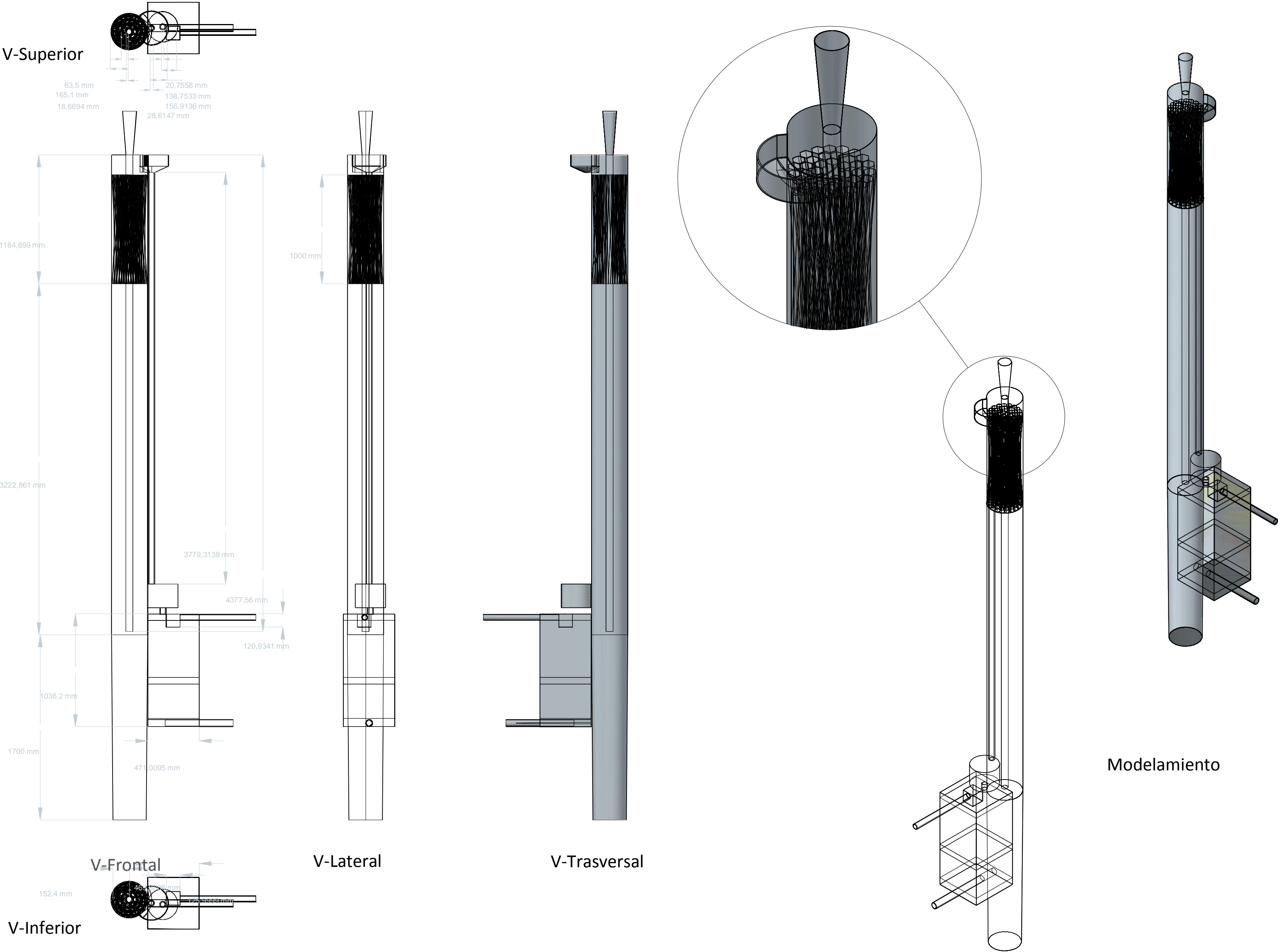
Material de fabricación	Se recomienda en <u>fibra de vidrio poliéster reforzado</u> , constituido de un lecho filtrante que contiene grava, arena y una pequeña capa de 6 mm de antracita.		
Condiciones de diseño	Parámetro	Rango	Valor obtenido
	Pérdida de carga inicial	0,30 m	0,46 m
Esquema			

Fuente: Autores

Plano del diseño del sistema compacto de potabilización

La imagen 8 muestra el plano del diseño del sistema compacto de potabilización en donde se incluyen las vistas principales, un corte transversal y el modelamiento en 3D

SISTEMA COMPACTO DE POTABILIZACIÓN



ISO A0 (841.00 x 1189.00 mm); E. 1:100

Fuente: Autores

Diseño Sistema compacto de potabilización.	Ingeniería ambiental.	Perfiles planos y tridimensionales	Universidad libre
	Lina María Mora Fajardo Harold Esteban Cortés Pinzón		Escala 1:100

Funcionamiento de la planta compacta

El sistema de potabilización diseñado, es un sistema compacto que consta de dos tanques cilíndricos concéntricos, el tanque central y de menor diámetro diseñado para operar con flujo descendente, permite realizar la mezcla rápida o coagulación, este tanque es alimentado por medio de una tubería dentro de la cual previamente se dosifica el agente coagulante. Dentro del tanque central el agua tendrá un movimiento giratorio que gracias a la velocidad a la cual el agua circula en el tanque se facilita la mezcla total del agua con el coagulante, durante el movimiento giratorio el agua descenderá hasta la salida en la parte baja del tanque, de manera que el agua continúe su movimiento giratorio dentro de un tanque de mayor diámetro.

Una vez el agua sale del tanque central, la velocidad angular del flujo se verá reducida debido al mayor diámetro del tanque exterior, permitiendo así que se efectúe la mezcla lenta, con el fin de facilitar la aglomeración o unión entre partículas que han sido desestabilizadas previamente por el coagulante. En el tanque cilíndrico exterior el agua ascenderá a una velocidad tal que las partículas aglomeradas o flocs no alcancen la salida del sistema, para mejorar la separación entre el agua y los flocs, el tanque exterior contará con un sistema de placas o paneles inclinados que harán que el flujo del agua que pasa a través de ellos tenga flujo laminar y que los flocs pierdan energía al chocar suavemente contra las láminas inclinadas y decantarse al fondo del tanque.

El tanque exterior y de mayor diámetro, presentará en su fondo la forma típica de una tolva permitiendo la acumulación de los lodos que se sedimenta durante el proceso para un periodo de tiempo fijo. Estos lodos deben ser tratados antes de ser vertidos.

Posteriormente y por gravedad, el agua desciende hacia dos filtros rápidos compuesto por un lecho filtrante que contiene en su interior, grava, arena y una pequeña capa de antracita.

Finalmente, el agua filtrada se dirige hacia un tanque de desinfección en el cual se aplica NaClO para garantizar un agua libre de bacterias.

Los cálculos para el diseño del sistema son esencialmente hidráulicos, ya que la dosificación de coagulante se determinó por medio de ensayos de jarras (test que se utiliza para determinar la concentración y dosis óptima de coagulante). La dosificación del coagulante se realizará directamente en la tubería que transporta el agua hasta el tanque de coagulación y los gradientes de mezcla se aseguran mediante el diseño hidráulico.

Ventajas del sistema compacto diseñado

Los sistemas compactos para el tratamiento de agua son medidas eficientes, surgen por la necesidad de brindar una solución a poblaciones medianas o pequeñas que no cuentan con un servicio de agua potable. Son diseñadas para poblaciones con un nivel de complejidad bajo y medio. Dentro del sistema se desarrollan procesos completos y confiables unificados en una sola unidad, por lo cual se debe su nombre “compacto”.

Algunas de las ventajas que estos sistemas compactos presentan con respecto a las plantas de tratamiento convencionales son las siguientes:

- Proveen soluciones inmediatas por sus cortos tiempos de Fabricación.
- Se requiere de una menor inversión en las obras civiles durante la fase de construcción.
- La instalación y operación son adaptables a las necesidades de la comunidad.
- Son flexibles en su ubicación debido a su carácter móvil.
- Requieren menor disponibilidad de espacio en comparación con los sistemas convencionales de tratamiento de agua.

- Operaciones rápidas en el mantenimiento preventivo y correctivo de las unidades que lo componen, asegurando el funcionamiento del sistema (Olaya, Muñoz, 2006).

Las siguientes son algunas de las ventajas que posee el sistema compacto de potabilización de agua diseñado para la Granja La Fortaleza:

- El agua extraída del pozo artesanal será sometida a todos los procesos convencionales de potabilización, aprovechando un sistema de tipo compacto en el cual se realizan las operaciones de Coagulación, Floculación y Sedimentación dentro de una sola unidad.
- El diseño de la planta es de tipo compacto, las operaciones de coagulación, floculación y sedimentación se realizan en un sistema de un solo modulo, el efluente del sistema compacto es llevado a un tanque para almacenamiento de donde es tomada y conducida para los diferentes procesos que se desarrollen en la Granja.
- El sistema presenta una altura relativamente baja y pequeño diámetro los módulos, los tanque adicionales para el almacenamiento del agua, también son de poca altura y poco diámetro, facilitando la movilidad o transporte del sistema de potabilización.
- El agente coagulante y el desinfectante son dosificados directamente sobre la tubería que lleva el agua hasta el sistema compacto, la dosificación se plantea que consista en la adición de químicos en forma totalmente líquida concentrada, sin la necesidad de que el operario tenga que disolver ninguno de ellos, evitando así riesgos por errada manipulación que pueden causar quemaduras químicas y eliminando del todo los tiempos requeridos para la preparación de químicos.

Mantenimiento general de la planta

Con el fin de asegurar una correcta operación de la planta y prolongar la vida útil de los equipos, se recomienda realizar el siguiente mantenimiento:

- Se debe evitar el ingreso de elementos extraños como hojas, palos, entre otros a la planta.
- Nunca debe operarse la planta si no se cuenta con alguno de los insumos químicos.
- Se debe realizar mantenimiento preventivo periódico a las bombas dosificadores de los insumos químicos y a la bomba ubicada en el pozo de succión.
- Los tanques de almacenamiento deben lavarse mensualmente.
- Cada tres meses se deben limpiar manualmente las bombas dosificadoras de químicos, tanto en las válvulas de pie, líneas de succión como de descarga y sus respectivas mangueras.
- Cada tres meses se debe vaciar y lavar completamente el Floculador.
- Cada seis meses se debe hacer mantenimiento y lubricación a las bombas dosificadoras (Roldan, 2007).

8.8 COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA COMPACTO DISEÑADO

Se realizaron cotizaciones en varias empresas dedicadas a la construcción de plantas compactas de potabilización; teniendo en cuenta la tabla 15, se seleccionó que la empresa N&F de Colombia era la indicada para construir la planta diseñada para la Granja La Fortaleza, debido a que presentaba costos más accesibles sosteniendo las dimensiones de la planta y los materiales propuestos.

Tabla 15. Costo total de construcción del sistema

Costos de construcción de la Planta Compacta de Potabilización	
Costos iniciales	Costo total
Análisis de calidad del agua – Laboratorios.	\$ 1.200.000
Costos de construcción	
Planta compacta con capacidad para procesar hasta 800 L/h (Cotización realizada en la empresa N&F de Colombia)	\$ 7.500.000
COSTO TOTAL	\$ 8.700.000

Fuente: Autores

9. CONCLUSIONES

Al evaluar las características físicas, químicas y microbiológicas de las muestras de agua tomadas de la Granja La Fortaleza se concluye; que los resultados de los procesos de coagulación – floculación y sedimentación dan lugar a un agua de calidad aceptable, en cuanto a la estabilización de pH, remoción de las partículas coloidales presentes en el agua (turbidez) y formación de un floc grande y denso, lo que permite anticipar que la calidad del agua después de que se efectúen los procesos de filtración y desinfección va a ser la adecuada de acuerdo con los valores máximos permisibles establecidos en la Resolución 2115 de 2007 en relación con las características que debe tener el agua potable y el índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano, en el cual se obtuvo un nivel de riesgo “SIN RIESGO” con un valor del 0%.

La determinación de las dosificaciones óptimas de insumos químicos en los procesos de coagulación - floculación y desinfección para el diseño del sistema, se llevaron a cabo mediante ensayos de laboratorio; a partir de ensayos de jarras se determinó el coagulante adecuado, los resultados obtenidos indicaron, que el policloruro de aluminio (PAC) presentó un mejor rendimiento en relación con el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). La dosis de PAC debe estar entre 15 – 20 mg/L a una concentración del 1% en masa. Se determinó la dosis óptima de desinfección a partir de los resultados obtenidos en las gráficas de punto de quiebre, las cuales se realizan para determinar la cantidad de desinfectante requerido con el fin de garantizar que el residual del desinfectante será suficiente para lograr la correcta desinfección del agua, la dosis adecuada de acuerdo a los ensayos realizados debe ser 2,5 mg NaClO por cada litro de agua tratada.

El dimensionamiento del sistema compacto de potabilización dio como resultado un sistema helicoidal de flujo descendente y ascendente, en donde a una altura de 6,478 m y un diámetro de 13" se desarrollan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, el proceso de filtración se realiza en dos (2) filtros cuadrados con 0,47 m de alto, 0,47 m de ancho y 1,036 m de profundidad, para su construcción se requiere un área total aproximada de 4 m², con la cual se asegura el suministro de agua de buena calidad, el diseño cumple con las restricciones establecidas por el RAS 2000 Título C referente a los componentes de un sistema de potabilización de agua. Garantizando agua potable para una comunidad con un nivel de complejidad bajo a partir de un sistema seguro, confiable, eficiente, sostenible y de calidad durante un periodo de 15 años.

Debido al bajo costo del material seleccionado (se recomendó construir la planta en fibra de vidrio de poliéster reforzado), la puesta en marcha del sistema es viable en términos monetarios en relación con el beneficio obtenido, ya que se considera relativamente alto porque se va a garantizar un suministro continuo a la población existente en la Granja tomando un máximo de 155 habitantes (capacidad de la Granja).

La planta compacta fue diseñada para trabajar con el caudal máximo diario, calculado teniendo en cuenta que la población flotante de la Granja es de 155 personas; Como no siempre se va a requerir que la misma cantidad de personas demanden del recurso, la planta va a trabajar con un caudal inferior al máximo, es decir, con el caudal medio diario; lo que da lugar a que haya espacio en el caso de un pequeño incremento poblacional.

10.RECOMENDACIONES

Se recomienda a los propietarios de la Granja, adquirir equipos de análisis que permitan llevar un control de calidad en todo el sistema, es decir, conocer el estado del recurso antes, durante y después del proceso de potabilización; con esto se busca dar mayorías garantías de la calidad del agua tratada. Los parámetros mínimos que deben ser medidos son pH, turbiedad, Coliformes fecales y realización de ensayos de jarras y desinfección, por tanto se recomienda adquirir un pHmetro portátil impermeable, turbidímetro – Nefelométrico portátil, equipo de jarras portable y un analizador de cloro residual portable.

Debido a la producción de lodos en los procesos de sedimentación y filtración se recomienda diseñar un sistema de recolección y tratamiento de lodos para su disposición final.

Se recomienda la fabricación de la planta en Resina de Poliéster grado Agua Potable, reforzada en fibra de vidrio también grado agua potable, que a diferencia de las fabricadas en lámina metálica, garantiza una muy larga vida útil sin presentar ningún tipo de corrosión o deterioro.

Se recomienda implementar un sistema de control para la operación de la planta; de esta forma se garantiza que la planta opere solo cuando sea necesario y tenga una prolongación de la vida útil.

11. BIBLIOGRAFÍA

“La prueba de jarras en una planta de tratamiento de agua potable”. 5 Marzo de 2014. En: (<http://www.r-chemical.com/blog/2012/01/31/la-prueba-de-jarras-en-una-planta-de-tratamiento-de-agua-potable/>). Quijandria Casanova Silvana.

“Manual técnico del agua”. 25 de Febrero de 2014. En: (www.degremont.com). Degremont.

Ambashta, R. Sillanpaa, M., (2010), Water purification using magnetic assistance: A review. *Journal of Hazardous Materials*. 180 (38 – 49) 1.

Antek s.a., Laboratorio de análisis ambiental y Geoquímica, *Requisitos para toma y preservación de muestras según análisis*, 2012, pp 1 – 8.

Arboleda Valencia, J., *Teoría y práctica de la purificación del agua*, 2000, McGraw-Hill. Tomo 1. Santafé de Bogotá, Colombia, pp 21- 40, 126 – 128, 147 – 155, 199- 215.

Arboleda Valencia, J., *Teoría y práctica de la purificación del agua*, 2000, McGraw-Hill. Tomo 2. Santafé de Bogotá, Colombia, pp 364 – 378, 439 – 445, 643 – 678.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Diseño de plantas potabilizadoras tipo de tecnología simplificada, 2007, pp 29 – 40, 47 – 48, 54, 57, 102 – 104, 126 – 134,

De Vargas, Lidia., *Tratamiento de agua para consumo humano – Plantas de filtración rápida*, 2004, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y ciencias del Ambiente. Lima, Perú, pp 5 – 17, 29 – 42.

Díaz Delgado, C. García Pulido, D. Solís Morelos, C., 2000, *Abastecimiento de Agua Potable para Pequeñas Comunidades Rurales por medio de un Sistema de Recolección de Lluvia-Planta Potabilizadora*, Ciencia Ergo Sum, p 6.

Espinoza, A. Martínez, E. 2011, *Diseño de una Planta Móvil de Potabilización de Agua*, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Cicyt, pp 6 - 7.

Estrada Torres, J. *Diseño de una Planta Portátil Potabilizadora de agua de 50 metros cúbicos por día*. Tesis de grado (Ingeniero mecánico). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. Guayaquil – Ecuador, 2011, pp 166 - 167.

Etienne, G., *Potabilización y tratamiento de agua. Diseños con Excel*, 2009, Eagan, Unites States, pp 88 – 89.

Finnemore, J. Franzini, J., *Fluid Mechanics with Engineering Applications*, 2002, Editorial McGraw – Hill. Tenth Edition. pp 345-356.

Gómez, G. Arias, G. *Plan de Salud Territorial Municipio de Melgar Tolima 2012– 2015*, 2012, pp 26 -27- 50-51-53-54-57.

Gómez, G. *Diagnostico Plan de desarrollo municipio de Melgar, “por un Melgar con Justicia Social 2012 – 2015”*, 2012, pp 46 - 47.

González Olabarria, P., *Desalación de agua mediante ósmosis inversa*, 2012, AMV ediciones. Madrid, España, pp 9, 23.

González, A., Rivera, M. L., Avilés, M., Pérez, S. *Evaluación de un sistema compacto de potabilización de agua para casas, habitación o pequeños comercios*. México D.F, 2002.

Gray Nif, *Calidad del agua potable – problemas y soluciones*, 1994, Editorial Acribia S.A. Zaragoza, España, pp 178 – 180, 305.

Hammer, M., *Water and Wastewater Technology*, 2012, Pearson Prentice Hall. New York, Unites States, pp 11.

Hilleboe M., H., *Manual de tratamiento de aguas*, 2001, LIMUSA S.A. México D.F, México. pp 21 – 27.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua*, 2007, pp 12.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). *Toma de Muestras de Aguas Subterráneas*, 2013, pp 1 – 13.

Isla de Juana, R., *Proyectos de plantas de tratamiento de aguas*, 2005, Bellisco. Madrid, España. pp 81 – 82.

Izquierdo, F. Castro Hermida, A. Fenoy, S. Mezo, M. González-Warleta, M. del Aguila, C., (2011), Detection of microsporidia in drinking water, wastewater and recreational rivers, *Water Research*. 45 (4837- 4843) 1.

Lee, J., Lee, C., Hugunin, K., Maute, C., Dysko, R., (2010), *Bacteria from drinking water supply and their fate in gastrointestinal tracts of germ-free mice: A phylogenetic comparison study*. Water Research. 44 (5050–5058) 1, 2.

Lehtola, M., Miettinen, L., Vartiainen, T., Rantakokko, P., Hirvonen, A., Martikainen, P., (2003), *Impact of UV disinfection on microbially available phosphorus, organic carbon, and microbial growth in drinking water*. Water Research. 37 (1064–1070) 2, 3.

Levy Beczko, M. Mongelós Peña, J., *Microplanta potabilizadora de agua como propuesta de solución para comunidades aisladas del departamento de CAAGUAZU*. Tesis de grado (Ingeniero Civil). Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”. Facultad de Ciencias y Tecnología. Caaguazú – Paraguay, 2004.

López Cualla, R., *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*, 2003, Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá D.C., Colombia, pp 131 -151.

López Geta, J. Martínez Navarrete, C. Moreno Merino, L. Navarrete Martínez, P., *Las aguas subterráneas y los plaguicidas*, instituto tecnológico GeoMinero de España, 1992, GARDELA S.A. Madrid, España, pp 19, 35.

Maldonado Rosas, O. Nova Martínez, A. *Evaluación de una alternativa de un sistema de potabilización de agua para la finca la pampa de la vereda la moneda del municipio de sabana de torres de Santander*. Monografía para optar por el título de especialista ambiental. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Bucaramanga – Colombia, 2012, pp 24 – 28, 54 – 59.

Olaya Valdés, D. Muñoz Camargo, D. *Optimización de los modelos compactos de potabilización de agua y tratamiento de agua residual doméstica de la compañía Acuaplantás Ingeniería LTDA*. Trabajo de práctica empresarial. Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá – Colombia, 2006, pp 7 – 22, 42 – 46.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). *La crisis mundial del agua*, 2005, pp 5-9.

Organización Mundial de la Salud (OMS), Fondo de la Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). *Proffress on Sanitation and Drinking- Water*, 2013, pp 19-35.

Organización Mundial de la Salud (OMS). *Guías para la calidad del agua potable*, 2006, pp 11, 14.

Prieto Bolívar, C., *El agua: Sus formas, Efectos, Abastecimientos, Usos, Daños, Control y Conservación*, 2004, ECOE ediciones. Santafé de Bogotá, Colombia, pp 13, 45, 46.

Raymond D., Lettaman., *Calidad y Tratamiento del Agua*, 2002, Editorial McGraw - Hill 5ª edición España., España, pp 918 – 959.

Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS – 2000) – Título B. Sistemas de Acueducto. República de Colombia Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS – 2000) – Título C. Sistemas de Potabilización. República de Colombia Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Resolución 2115 de 2007. Ministerio de la Protección Social Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.*

Reynolds, Tom D., Richards, Paul A., Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, 1996, Segunda Edición, PWS Publishing Company, pp 742-747.

Rice, E., Baird, R., Eaton A., Clesceri, L., *Standard Methods. For the Examination of Water and Wastewater*, 2012, APHA, AWWA, WEF. Washington, DC, Unites States, pp 2-12- 13, 2-31.

Rodier, J., Legube, B., Merlet N., *Análisis del agua*, 2009, Omega, S.A. Barcelona, España, pp 30, 45, 83, 118.

Rodríguez Peña, C., *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Agua*, 1995, Santafé de Bogotá, Colombia, p 37.

Rodríguez Vidal, F., *Procesos de Potabilización del Agua e Influencia del Tratamiento de Ozonificación*, 2003, Díaz de Santos, S.A. Madrid, España. pp 13 - 14, 30,31.

Roldan cubillos, F., *Planta de Potabilización de agua Superficial Corregimiento “el dos”*. Manual de operación y mantenimiento. 2007.

Romero Rojas, J., *Calidad del agua*, 2005, Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá D.C., Colombia, pp 110,112, 135,142, 157, 187, 233 – 236, 251 – 252, 298.

Romero Rojas, J., *Potabilización del agua*, 1999, Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá D.C., Colombia, pp 117 – 243.

Romero Rojas, J., *Purificación del agua*, 2006, Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá D.C., Colombia, pp 84, 141 – 160, 293 – 295, 277 – 281.

Saldarriaga, J., *Hidráulica de tuberías. Abastecimiento de agua, redes, riesgos*, 2007, Alfaomega. Bogotá D.C., Colombia, pp 187 – 222.

Sierra Ramírez, C., *Calidad del agua. Evaluación y Diagnostico*, 2011, Ediciones de la U. Medellín, Colombia, pp 48 – 49, 52, 58.

Teunis, P., Rutjes, S., Westrell, T., de Roda Husman. A., (2009), *Characterization of drinking water treatment for virus risk assessment*, *Water Research*. 43 (395 – 404) 1 – 3.

Torres Quintero, J., *Técnicas Nucleares y Convencionales en Aguas Superficiales y Subterráneas*, 2006, Digital Ltda. Bogotá D.C., Colombia, p 57.

Viejo Zubicata, M., Álvarez Fernández, J., *BOMBAS. Teoría, diseño y aplicaciones*, 2004, Editorial Limusa. Mexico, D.F, pp 208.

Viessman, W., Hammer, M., Pérez, E., Chadik, P., *Water Supply & Pollution Control*, 2009, Pearson Prentice Hall. Florida Unites States, pp 381, 431.

ANEXO A. ENSAYO DE JARRAS – DETERMINACIÓN DEL COAGULANTE

La tabla que se muestra enseguida contiene los resultados del ensayo de jarras realizado para la determinación del coagulante más óptimo. Las franjas de color amarillo - naranja representan las dosis del coagulante con mejor rendimiento respectivamente. La franja de color naranja representa el tipo de coagulante seleccionado para desarrollar los posteriores ensayos. La franja de color azul representa el cálculo de dureza en el agua cruda.

La determinación de dureza total se llevó a cabo a partir de la siguiente ecuación establecida en los Standard Methods:

$$\text{Dureza (EDTA) mg CaCO}_3/\text{l} = \frac{V_{\text{Titulante (ml)}} * N_{\text{Titulante}} * 100000}{V_{\text{muestra (ml)}}$$

Dónde: el Volumen del titulante corresponde a la titulación EDTA en la tabla (dato obtenido en el laboratorio), la normalidad del titulante 0,01 N y el Volumen de la muestra a 100 mL.

Tabla 16. Selección del coagulante adecuado

PROCESOS DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN : ENSAYO DE JARRAS

		Muestra de agua Inicial				CÁLCULOS	Muestra con Sulfato de Aluminio (Al ₂ (SO ₄) ₃) 1%				Muestra con Policloruro de Aluminio 1%			
Número	Fecha de Muestreo	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación EDTA (mL)	DUREZA (mg/L)	Volumen (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Volumen (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)
0	12-may-14	5,820	15,70	>1000	9,50	95,0	1,00	5,91	16,20	3,32	1,00	6,20	17,30	3,24
							2,00	5,72	16,30	25,24	2,00	5,95	17,40	13,73
							3,00	5,61	16,30	27,96	3,00	5,91	17,20	23,60
							4,00	5,26	16,60	34,82	4,00	5,83	17,60	24,10
		Gradiente de Velocidad (rpm)				40				40				
		Tiempo de Floculación (min)				15				15				
		Tiempo de Decantación (min)				7				6				

Fuente: Autores

ANEXO B. ENSAYO DE JARRAS

Las tablas que se muestran enseguida contienen los resultados de los ensayos de jarra realizados con policloruro de aluminio para la determinación de la dosis óptima de coagulación. Las franjas de color naranja corresponden a la dosis de mejor rendimiento. Las franjas de color azul corresponden a los cálculos de dureza para la muestra de agua inicial y la muestra de agua tratada.

El cálculo de dureza total se desarrolló teniendo en cuenta la metodología explicada en el **ANEXO A**.

Tabla 17. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 0

		Muestra de agua Inicial				CÁLCULOS	Muestra con Policloruro de Aluminio 1%					CÁLCULOS
Número	Fecha de Muestreo	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación EDTA (mL)	DUREZA (mg/L)	V (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación (mL EDTA)	DUREZA (mg/L)
0	28-may-14	7,375	15,00	83,26	4,60	46,00	0,25	7,74	15,80	18,69	3,70	37,00
							0,50	7,40	15,30	13,63	4,10	41,00
							0,75	7,60	15,10	3,59	4,00	40,00
							1,00	7,72	15,30	8,95	4,20	42,00
		Gradiente de Velocidad (rpm)					40					
		Tiempo de Floculación (min)					15					
		Tiempo de Decantación (min)					10					

Fuente: Autores

Tabla 18. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 1

		Muestra de agua Inicial				CÁLCULOS	Muestra con Policloruro de Aluminio 1%					CÁLCULOS
Número	Fecha de Muestreo	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación EDTA (mL)	DUREZA (mg/L)	V (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación (mL EDTA)	DUREZA (mg/L)
1	10-jun-14	6,140	17,60	>1000	3,50	35,00	0,50	6,43	17,70	9,90	3,00	30,00
							0,75	6,37	17,60	5,08	3,00	30,00
							1,00	6,38	17,60	11,35	3,30	33,00
							1,50	6,28	17,90	32,54	3,30	33,00
		Gradiente de Velocidad (rpm)					31					
		Tiempo de Floculación (min)					17					
		Tiempo de Decantación (min)					2					

Fuente: Autores

Tabla 19. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 2

		Muestra de agua Inicial				CÁLCULOS	Muestra con Policloruro de Aluminio 1%					CÁLCULOS
Número	Fecha de Muestreo	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación EDTA (mL)	DUREZA (mg/L)	V (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación (mL EDTA)	DUREZA (mg/L)
2	16-jun-14	7,221	17,30	103,00	4,20	42,00	0,50	7,79	18,90	32,10	4,00	40,00
							0,75	7,62	19,00	21,47	4,20	42,00
							1,00	7,49	18,40	24,03	4,00	40,00
							1,25	7,33	18,40	31,70	4,10	41,00
Fuente: Autores		Gradiente de Velocidad (rpm)					30					
		Tiempo de Floculación (min)					30					
		Tiempo de Decantación (min)					5					

Fuente: Autores

Tabla 20. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 3

		Muestra de agua Inicial				CÁLCULOS	Muestra con Policloruro de Aluminio 1%					CÁLCULOS
Número	Fecha de Muestreo	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación EDTA (mL)	DUREZA (mg/L)	V (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación (mL EDTA)	DUREZA (mg/L)
3	24-jun-14	5,990	14,50	55,00	3,00	30,00	0,50	6,32	16,20	17,04	2,80	28,00
							0,75	6,25	16,50	18,45	2,90	29,00
							1,00	6,22	16,40	19,83	3,00	30,00
							1,25	6,12	16,70	22,30	3,00	30,00
Fuente: Autores		Gradiente de Velocidad (rpm)					40					
		Tiempo de Floculación (min)					20					
		Tiempo de Decantación (min)					6					

Fuente: Autores

Tabla 21. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 4

		Muestra de agua Inicial				CÁLCULOS	Muestra con Policloruro de Aluminio 1%					CÁLCULOS
Número	Fecha de Muestreo	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación EDTA (mL)	DUREZA (mg/L)	V (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación (mL EDTA)	DUREZA (mg/L)
4	02-jul-14	6,390	18,50	254,00	4,00	40,00	0,50	6,65	19,22	24,12	3,70	37,00
							0,75	6,76	19,20	21,60	3,80	38,00
							1,00	6,80	19,18	22,34	3,80	38,00
							1,25	6,78	19,21	22,47	3,90	39,00
		Gradiente de Velocidad (rpm)					40					
		Tiempo de Floculación (min)					32					
		Tiempo de Decantación (min)					6					

Fuente: Autores

Tabla 22. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 5

		Muestra de agua Inicial				CÁLCULOS	Muestra con Policloruro de Aluminio 1%					CÁLCULOS
Número	Fecha de Muestreo	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación EDTA (mL)	DUREZA (mg/L)	V (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación (mL EDTA)	DUREZA (mg/L)
5	08-jul-14	6,220	16,30	104,00	3,50	35,00	0,50	6,48	18,30	74,32	3,50	35,00
							0,75	6,43	18,40	42,45	3,30	33,00
							1,00	6,39	18,20	33,65	3,20	32,00
							1,25	6,27	18,20	39,34	3,40	34,00
Fuente: Autores		Gradiente de Velocidad (rpm)					40					
		Tiempo de Floculación (min)					20					
		Tiempo de Decantación (min)					8					

Fuente: Autores

Tabla 23. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 6

		Muestra de agua Inicial				CÁLCULOS	Muestra con Policloruro de Aluminio 1%					CÁLCULOS
Número	Fecha de Muestreo	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación EDTA (mL)	DUREZA (mg/L)	V (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación (mL EDTA)	DUREZA (mg/L)
6	22-jul-14	7,015	15,40	197,00	3,30	33,00	0,50	7,45	14,50	15,33	3,28	32,80
							0,75	7,31	14,70	13,55	3,00	30,00
							1,00	7,30	14,70	14,23	3,12	31,20
							1,25	7,28	14,60	13,89	3,20	32,00
Fuente: Autores		Gradiente de Velocidad (rpm)					40					
		Tiempo de Floculación (min)					15					
		Tiempo de Decantación (min)					2					

Fuente: Autores

Tabla 24. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 7

		Muestra de agua Inicial				CÁLCULOS	Muestra con Policloruro de Aluminio 1%					CÁLCULOS
Número	Fecha de Muestreo	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación EDTA (mL)	DUREZA (mg/L)	V (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación (mL EDTA)	DUREZA (mg/L)
7	04-ago-14	7,766	16,00	350,00	4,00	40,00	0,50	7,51	16,30	245,00	3,80	38,00
							0,75	7,45	16,20	138,00	3,70	37,00
							1,00	7,41	16,20	71,00	3,70	37,00
							1,25	7,39	16,30	89,00	3,60	36,00
Fuente: Autores		Gradiente de Velocidad (rpm)					40					
		Tiempo de Floculación (min)					15					
		Tiempo de Decantación (min)					5					

Fuente: Autores

Tabla 25. Ensayo de Jarras realizado para la muestra de agua 8

		Muestra de agua Inicial				CÁLCULOS	Muestra con Policloruro de Aluminio 1%					CÁLCULOS
Número	Fecha de Muestreo	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación EDTA (mL)	DUREZA (mg/L)	V (mL)	pH	T (°C)	Turbiedad (UNT)	Titulación (mL EDTA)	DUREZA (mg/L)
8	20-ago-14	7,634	17,80	142,50	4,50	45,00	0,50	8,21	17,40	19,65	3,80	38,00
							0,75	7,83	17,70	12,20	3,80	38,00
							1,00	7,80	17,50	45,87	3,90	39,00
							1,25	7,73	17,80	68,98	3,70	37,00
Fuente: Autores		Gradiente de Velocidad (rpm)					40					
		Tiempo de Floculación (min)					15					
		Tiempo de Decantación (min)					2					

Fuente: Autores

ANEXO C. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO

Alcalinidad total: La determinación de la alcalinidad se desarrolló a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad (HCl) mg CaCO}_3/\text{l} = \frac{V_{\text{Titulante (ml)}} * N_{\text{Titulante}} * 50000}{V_{\text{muestra (ml)}}$$

Dónde, el Volumen del titulante corresponde a la titulación con HCl de la tabla 26 (datos obtenidos en el laboratorio de la muestra de agua inicial y tratada), la normalidad del titulante 0,05 N y el Volumen de la muestra a 150 mL.

Tabla 26. Determinación de Alcalinidad Total: Método Titulación HCl

Número	Titulación [HCl] = 0,05 N				Cálculo Alcalinidad	
	Muestra inicial		Muestra tratada		Muestra inicial	Muestra tratada
	pH	Vol HCl (mL)	pH	Vol HCl (mL)	mg CaCO ₃ /L	mg CaCO ₃ /L
1	4,3	1,2961	4,3	1,0203	21,6017	17,0050
	8,5	0	8,5	0		
2	4,3	3,1092	4,3	2,7202	51,8200	45,3367
	8,5	0	8,5	0		
3	4,3	1,8611	4,3	1,5391	31,0183	25,6517
	8,5	0	8,5	0		
4	4,3	2,2721	4,3	1,9937	37,8683	33,2283
	8,5	0	8,5	0		
5	4,3	1,7145	4,3	1,4848	28,5750	24,7467
	8,5	0	8,5	0		
6	4,3	2,1671	4,3	1,5943	36,1183	26,5717
	8,5	0	8,5	0		
7	4,3	2,1312	4,3	1,3019	35,5200	21,6983
	8,5	0	8,5	0		
8	4,3	2,0734	4,3	1,8885	34,5567	31,4750
	8,5	0	8,5	0		

Fuente: Autores

Acidez total: La determinación de la acidez se desarrolló a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Acidez (NaOH) mg CaCO}_3/\text{l} = \frac{V_{\text{Titulante (ml)}} * N_{\text{Titulante}} * 50000}{V_{\text{muestra (ml)}}$$

Dónde, el Volumen del titulante corresponde a la titulación con NaOH de la tabla 27 (datos obtenidos en el laboratorio de la muestra de agua inicial y tratada), la normalidad del titulante 0,1 N y el Volumen de la muestra a 150 mL.

Tabla 27. Determinación de Acidez: Método Titulación NAOH

Número	Titulación [NaOH] = 0,1 N				Cálculo Acidez	
	Muestra inicial		Muestra tratada		Muestra inicial	Muestra tratada
	pH	Vol NaOH (mL)	pH	Vol NaOH (mL)	mg CaCO ₃ /L	mg CaCO ₃ /L
1	8,5	0,8663	8,5	0,0978	28,8767	3,2600
	4,3	0	4,3	0		
2	8,5	0,5552	8,5	0,5832	18,5067	19,4400
	4,3	0	4,3	0		
3	8,5	0,9121	8,5	0,5986	30,4033	19,9533
	4,3	0	4,3	0		
4	8,5	0,7771	8,5	0,6899	25,9033	22,9967
	4,3	0	4,3	0		
5	8,5	0,7461	8,5	0,1994	24,8700	6,6467
	4,3	0	4,3	0		
6	8,5	1,56	8,5	1,335	52,0000	44,5000
	4,3	0	4,3	0		
7	8,5	1,3007	8,5	0,9486	43,3567	31,6200
	4,3	0	4,3	0		
8	8,5	1,2449	8,5	0,9345	41,4967	31,1500
	4,3	0	4,3	0		

Fuente: Autores

Sulfatos (SO_4^-): la determinación de sulfatos se desarrolló a partir de la siguiente ecuación, obtenida previamente de una curva de calibración:

$$\text{mg SO}_4^-/\text{L} = 80,07195 * \text{Abs} + 0,79424$$

En la ecuación, la absorbancia se reemplaza por las UA corregidas de las muestras de agua inicial y tratada como se observa en la tabla, obtenidas a partir del método espectrofotométrico a una longitud de onda de 420 nm.

Tabla 28. Cantidad de Sulfatos presentes en el agua: Método Espectrofotometría

Número	Absorbancia Muestra ($\lambda = 420 \text{ nm}$)					Cálculo de Sulfatos	
	Blanco (UA)	Inicial (UA)	Tratada (UA)	Inicial (UA corregida)	Tratada (UA corregida)	Muestra inicial (mg SO_4^-/L)	Muestra tratada (mg SO_4^-/L)
1	0,045	0,060	0,054	0,015	0,009	1,99532	1,51489
2	0,000	0,027	0,044	0,027	0,044	2,95618	4,31741
3	0,062	0,075	0,069	0,013	0,007	1,83518	1,35474
4	0,106	0,140	0,111	0,034	0,005	3,51669	1,19460
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,79424	0,79424
6	0,082	0,087	0,087	0,005	0,005	1,19460	1,19460
7	0,027	0,036	0,036	0,009	0,009	1,51489	1,51489
8	0,086	0,093	0,093	0,007	0,007	1,35474	1,35474

Fuente: Autores

Nitritos (NO₂): la determinación de nitritos se desarrolló a partir de la siguiente ecuación, obtenida previamente de una curva de calibración:

$$\text{NO}_2 = 0,236117 * \text{Abs} + 1,520346 * 10^{-3}$$

El valor de Abs en la ecuación fue reemplazado por los valores de las columnas de muestra de agua inicial y tratada corregida de la siguiente tabla.

Tabla 29. Cantidad de Nitritos presentes en el agua: Método Espectrofotometría

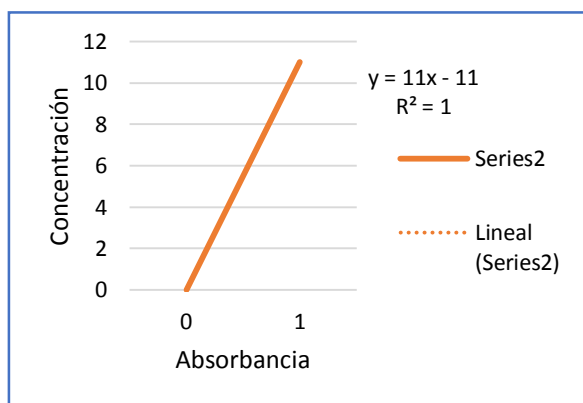
Número	Absorbancia Muestra ($\lambda = 453 \text{ nm}$)					Cálculo de Nitritos	
	Blanco (UA)	Inicial (UA)	Tratada (UA)	Inicial (UA corregida)	Tratada (UA corregida)	Muestra Inicial (mg NO ₂ /L)	Muestra tratada (mg NO ₂ /L)
1	0,054	0,152	0,009	0,098	-0,045	0,024660	ND
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001520	0,001520
3	0,031	0,035	0,035	0,004	0,004	0,002465	0,002465
4	0,079	0,094	0,078	0,015	-0,001	0,005062	0,001284
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001520	0,001520
6	0,046	0,046	0,048	0,000	0,002	0,001520	0,001993
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001520	0,001520
8	0,054	0,060	0,059	0,006	0,005	0,002937	0,002701

Fuente: Autores

Nitratos (NO₃): la determinación de nitratos se desarrolló a partir de la siguiente ecuación, obtenida previamente de una curva de calibración:

$$\text{mg/L N - NO}_3 = m * (\text{Absorbancia 220 nm} - (2 * \text{Absorbancia 275 nm}))$$

El valor de la pendiente (m) fue determinado a partir de una curva de calibración así:



Abs	[]
0	0
1	11

Datos curva de calibración	
Pendiente (m)	11
Intercepto (b)	0
Coeficiente de correlación (r)	1

Los valores de absorbancia a las diferentes longitudes de onda reemplazados en la ecuación corresponden en la tabla a las muestras de agua inicial y tratada corregidas.

Tabla 30. Cantidad de Nitratos presentes en el agua: Método Espectrofotometría

Número	Nitratos $\lambda = 220$ nm			Nitratos $\lambda = 275$ nm			Nitratos $\lambda = 220$ nm		Nitratos $\lambda = 275$ nm		Cálculo de Nitratos	
	Blanco (UA)	Inicial (UA)	Tratada (UA)	Blanco (UA)	Inicial (UA)	Tratada (UA)	Inicial (UA corregida)	Tratada (UA corregida)	Inicial (UA corregida)	Tratada (UA corregida)	Muestra Inicial (mg NO ₃ ⁻ /L)	Muestra Tratada (mg NO ₃ ⁻ /L)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	ND	ND
2	0,141	0,286	0,251	0,052	0,137	0,121	0,132	0,110	0,085	0,069	ND	ND
3	0,204	0,263	0,254	0,112	0,140	0,137	0,059	0,050	0,028	0,025	0,033	ND
4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	ND	ND
5	0,075	0,135	0,165	0,002	0,014	0,030	0,060	0,090	0,012	0,028	0,396	0,374
6	3,482	3,483	3,488	3,396	3,397	3,406	0,001	0,006	0,001	0,010	ND	ND
7	3,408	3,420	3,416	3,280	3,296	3,294	0,012	0,008	0,016	0,014	ND	ND
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	ND	ND

Fuente: Autores

Cloruros (Cl⁻):

Tabla 31. Determinación de cloruros

Número	Muestra de agua inicial (ppm)	Muestra de agua tratada (ppm)
1	150,30	36,20
2	138,00	23,10
3	200,50	72,60
4	124,20	18,10
5	165,90	17,70
6	182,00	34,20
7	204,60	76,80
8	144,00	21,20

Fuente: Autores

Cadmio (Cd): La cantidad de Cadmio presente en las muestras de agua analizadas se determinó por el método espectrofotométrico a partir de los datos obtenidos de una curva de calibración. Los datos de la curva de calibración son los siguientes:

Curva de Calibración Cd	
ppm	Abs
0,25	0,041
0,50	0,082
1,00	0,164
1,50	0,240
2,00	0,316

Datos curva de calibración	
Pendiente (m)	0,1571
Intercepto (b)	0,0036
Coeficiente de correlación (r)	0,9998

Teniendo en cuenta el valor de la pendiente (m), el intercepto (b) y los valores de absorbancia de las muestras de agua inicial y tratada (columna 2 y 3 de la tabla 32) fue posible determinar la concentración de Cadmio para cada una de estas.

Tabla 32. Cantidad de Cadmio presente en el agua: Método Espectrofotometría

Número	Absorbancia		Cálculo de la concentración Cadmio	
	Muestra inicial (Abs)	Muestra tratada (Abs)	Muestra inicial (ppm)	Muestra tratada (ppm)
1	0,000	0,000	ND	ND
2	0,001	0,002	ND	ND
3	0,003	0,002	ND	ND
4	0,000	0,000	ND	ND
5	0,000	0,000	ND	ND
6	0,002	0,002	ND	ND
7	0,000	0,000	ND	ND
8	0,000	0,000	ND	ND

Fuente: Autores

Plomo (Pb): La cantidad de Plomo presente en las muestras de agua analizadas se determinó por el método espectrofotométrico a partir de los datos obtenidos de una curva de calibración. Los datos de la curva de calibración son los siguientes:

Curva de Calibración Pb	
ppm	Abs
5,0	0,046
10,0	0,091
20,0	0,186

Datos curva de calibración	
Pendiente (m)	0,0094
Intercepto (b)	-0,0015
Coeficiente de correlación (r)	0,9999

Teniendo en cuenta el valor de la pendiente (m), el intercepto (b) y los valores de absorbancia de las muestras de agua inicial y tratada (columna 2 y 3 de la tabla 33) fue posible determinar la concentración de Plomo para cada una de estas.

Tabla 33. Cantidad de Plomo presente en el agua: Método Espectrofotometría

Número	Absorbancia		Cálculo de la concentración Plomo	
	Muestra inicial (Abs)	Muestra tratada (Abs)	Muestra inicial (ppm)	Muestra tratada (ppm)
1	0,00	0,00	ND	ND
2	0,00	0,00	ND	ND
3	0,00	0,00	ND	ND
4	0,00	0,00	ND	ND
5	0,00	0,00	ND	ND
6	0,00	0,00	ND	ND
7	0,00	0,00	ND	ND
8	0,00	0,00	ND	ND

Fuente: Autores

Calcio (Ca): La cantidad de Calcio presente en las muestras de agua analizadas se determinó por el método espectrofotométrico a partir de los datos obtenidos de una curva de calibración. Los datos de la curva de calibración son los siguientes:

Curva de Calibración	
ppm	Abs
1,00	0,076
4,00	0,252
5,00	0,305

Datos curva de calibración	
Pendiente (m)	0,0576
Intercepto (b)	0,0191
Coeficiente de correlación (r)	0,9998

Teniendo en cuenta el valor de la pendiente (m), el intercepto (b) y los valores de absorbancia de las muestras de agua inicial y tratada (columna 2 y 3 de la tabla 34) fue posible determinar la concentración de Calcio para cada una de estas.

Tabla 34. Cantidad de Calcio presente en el agua: Método Espectrofotometría

Número	Absorbancia		Cálculo de la concentración Calcio	
	Muestra inicial (Abs)	Muestra tratada (Abs)	Muestra inicial (ppm)	Muestra tratada (ppm)
1	0,394	0,382	6,512	6,303
2	0,579	0,577	9,725	9,690
3	0,433	0,412	7,189	6,824
4	0,493	0,491	8,231	8,196
5	0,347	0,332	5,695	5,435
6	0,512	0,501	8,561	8,370
7	0,487	0,476	8,127	7,936
8	0,338	0,324	5,539	5,296

Fuente: Autores

Hierro (Fe): La cantidad de Hierro presente en las muestras de agua analizadas se determinó por el método espectrofotométrico a partir de los datos obtenidos de una curva de calibración. Los datos de la curva de calibración son los siguientes:

Curva de Calibración Fe	
ppm	Abs
1,00	0,20
2,00	0,40
3,00	0,60
5,00	1,00

Datos curva de calibración	
Pendiente (m)	0,2000
Intercepto (b)	0,0000
Coeficiente de correlación (r)	1,0000

Teniendo en cuenta el valor de la pendiente (m), el intercepto (b) y los valores de absorbancia de las muestras de agua inicial y tratada (columna 2 y 3 de la tabla 35) fue posible determinar la concentración de Hierro para cada una de estas.

Tabla 35. Cantidad de Hierro presente en el agua: Método Espectrofotometría

Número	Absorbancia		Cálculo de la concentración Hierro	
	Muestra inicial (Abs)	Muestra tratada (Abs)	Muestra inicial (ppm)	Muestra tratada (ppm)
1	0,031	0,026	0,155	0,130
2	0,006	0,002	0,030	0,010
3	0,009	0,005	0,045	0,025
4	0,001	0,000	0,005	0,000
5	0,005	0,003	0,025	0,015
6	0,012	0,009	0,060	0,045
7	0,007	0,006	0,035	0,030
8	0,021	0,018	0,105	0,090

Fuente: Autores

Magnesio (Mg): La cantidad de Magnesio presente en las muestras de agua analizadas se determinó por el método espectrofotométrico a partir de los datos obtenidos de una curva de calibración. Los datos de la curva de calibración son los siguientes:

Curva de Calibración Mg	
ppm	Abs
0,10	0,076
0,40	0,236
0,50	0,284

Datos curva de calibración	
Pendiente (m)	0,5231
Intercepto (b)	0,0243
Coeficiente de correlación (r)	0,9998

Teniendo en cuenta el valor de la pendiente (m), el intercepto (b) y los valores de absorbancia de las muestras de agua inicial y tratada (columna 2 y 3 de la 36) fue posible determinar la concentración de Magnesio para cada una de estas.

Tabla 36. Cantidad de Magnesio presente en el agua: Método Espectrofotometría

Número	Absorbancia		Cálculo de la concentración Magnesio	
	Muestra inicial (Abs)	Muestra tratada (Abs)	Muestra inicial (ppm)	Muestra tratada (ppm)
1	0,461	0,448	0,835	0,810
2	0,491	0,488	0,892	0,886
3	0,076	0,071	0,099	0,089
4	0,231	0,228	0,395	0,389
5	0,543	0,529	0,992	0,965
6	0,458	0,446	0,829	0,806
7	0,232	0,211	0,397	0,357
8	0,501	0,499	0,911	0,908

Fuente: Autores

Zinc (Zn): La cantidad de Zinc presente en las muestras de agua analizadas se determinó por el método espectrofotométrico a partir de los datos obtenidos de una curva de calibración. Los datos de la curva de calibración son los siguientes:

Curva de Calibración Zn	
ppm	Abs
0,10	0,013
0,50	0,117
1,00	0,256
2,00	0,453

Datos curva de calibración	
Pendiente (m)	0,2310
Intercepto (b)	0,0018
Coeficiente de correlación (r)	0,9963

Teniendo en cuenta el valor de la pendiente (m), el intercepto (b) y los valores de absorbancia de las muestras de agua inicial y tratada (columna 2 y 3 de la tabla 37) fue posible determinar la concentración de Zinc para cada una de estas.

Tabla 37. Cantidad de Zinc presente en el agua: Método Espectrofotometría

Número	Absorbancia		Cálculo de la concentración Zinc	
	Muestra inicial (Abs)	Muestra tratada (Abs)	Muestra inicial (ppm)	Muestra tratada (ppm)
1	0,00	0,00	ND	ND
2	0,00	0,00	ND	ND
3	0,00	0,00	ND	ND
4	0,00	0,00	ND	ND
5	0,00	0,00	ND	ND
6	0,00	0,00	ND	ND
7	0,00	0,00	ND	ND
8	0,00	0,00	ND	ND

Fuente: Autores

Coliformes fecales – Escherichia coli: La determinación de Escherichia coli se realizó por el método de filtración de membrana. Los resultados obtenidos de las UFC/100m³ de las muestras de agua analizadas se presentan en la siguiente tabla, así como el % de remoción de con respecto a la muestra de agua inicial. El cálculo del % de remoción se realizó teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$\% \text{ remoción} = 1 - \frac{\text{Muestra tratada (UFC/100m}^3\text{)}}{\text{Muestra inicial (UFC/100m}^3\text{)}}$$

Tabla 38. Escherichia coli en las muestras de agua

Número	Muestra inicial (UFC/100m³)	Muestra tratada (UFC/100m³)	% Remoción
1	208	2	99,038%
2	239	2	99,163%
3	600	8	98,667%
4	490	5	98,980%
5	730	7	99,041%
6	330	4	98,788%
7	560	6	98,929%
8	215	3	98,605%

Fuente: Autores

ANEXO D. DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO AMONIAL

Se determinó la presencia en el agua de Nitrógeno Amoniacal a partir de la siguiente ecuación:

$$NH_3 - N \text{ mg/L} = \frac{(A - B) * N_{\text{Titulante}} * 280}{V_{\text{muestra (ml)}}$$

Dónde, A es el volumen de HCl gastado en la titulación, correspondiente a las columnas 1 y 2 de la tabla 39 (datos obtenidos en el laboratorio de la muestra de agua inicial y tratada), B es el volumen de HCl gastado en la titulación del blanco, 0,01 mg/L, N es la Normalidad del titulante 1 N y V es el Volumen de la muestra a 100 mL.

Tabla 39. Cantidad de Nitrógeno Amoniacal presente en el agua: Método Titulación con HCl

Número	Titulación [HCl] = 1 N		Cálculos	
	Muestra de agua inicial (mL HCl)	Muestra de agua tratada (mL HCl)	Muestra de agua inicial (mg/L)	Muestra de agua tratada (mg/L)
1	0,04	0,04	0,084	0,084
2	0,2	0,05	0,532	0,112
3	0,06	0,03	0,14	0,056
4	0,1	0,07	0,252	0,168
5	0,09	0,08	0,224	0,196
6	0,05	0,03	0,112	0,056
7	0,2	0,07	0,532	0,168
8	0,03	0,02	0,056	0,028

Fuente: Autores

ANEXO E. REGISTRO FOTOGRÁFICO

Imagen 9. Medición de pH en el laboratorio



Fuente: Autores

Imagen 10. Medición de cloruros en el laboratorio



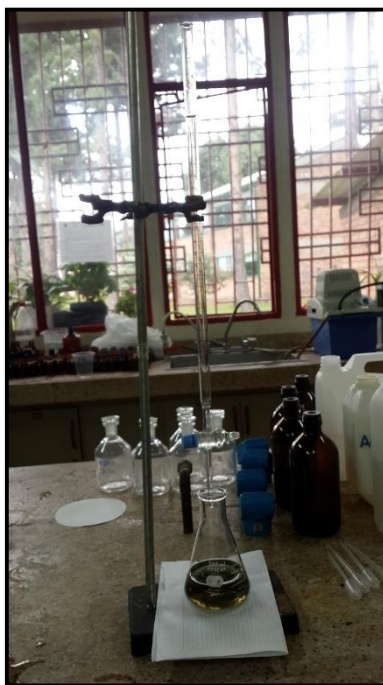
Fuente: Autores

Imagen 11. Medición de nitrógeno amoniacal en el laboratorio



Fuente: Autores

Imagen 12. Medición de dureza en el laboratorio



Fuente: Autores

Imagen 13. Medición de acidez y alcalinidad en el laboratorio



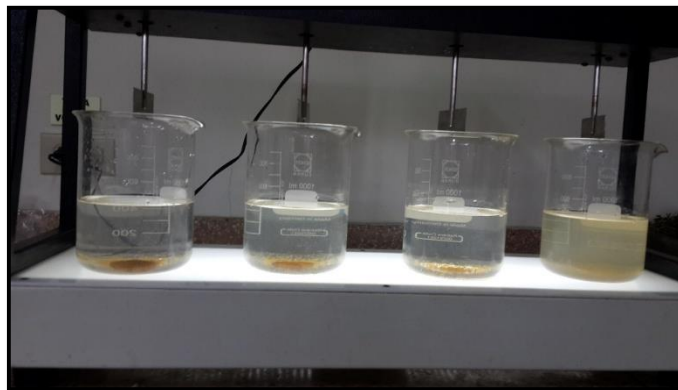
Fuente: Autores

Imagen 14. Ensayo de jarras realizado en el laboratorio agua tratada - Muestra 8



Fuente: Autores

Imagen 15. Ensayo de jarras realizado en el laboratorio agua tratada – Muestra 5



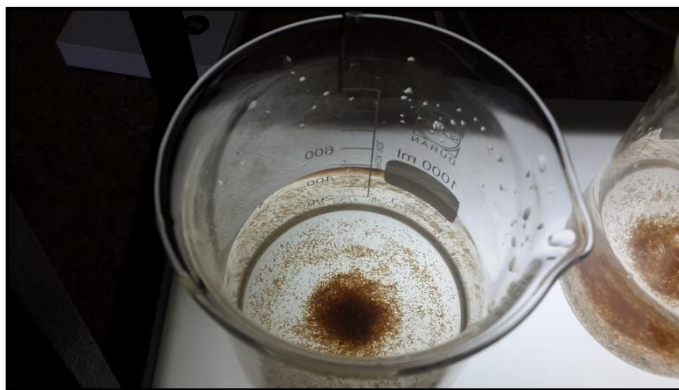
Fuente: Autores

Imagen 16. Ensayo de jarras realizado en el laboratorio agua cruda



Fuente: Autores

Imagen 17. Floc formado a partir del ensayo de jarras realizado en el laboratorio - Muestra 4



Fuente: Autores

Imagen 18. Floc formado a partir del ensayo de jarras realizado en el laboratorio - Muestra 2



Fuente: Autores

ANEXO F. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO (IRCA)

Tabla 40. Cálculo del IRCA

Parámetros de la Resolución			Valores promedio mensuales		
Característica	Puntaje de riesgo	Valor máximo aceptable	<u>Valores reportados</u>	Valores de calculo	IRCA CACULADO
Color Aparente	6	15		0	0
Turbiedad	15	2	1	0	0
pH	1,5	6,5 - 9	7,83	0	0
Color residual libre	15	0,3 - 2	0,32	0	0
Alcalinidad Total	1	200	28,2114	0	0
Calcio	1	60	7,256	0	0
Fosfatos	1	0,5		0	0
Manganeso	1	0,1		0	0
Molibdeno	1	0,07		0	0
Magnesio	1	36	0,651	0	0
Zinc	1	3	0	0	0
Dureza total	1	300	40	0	0
Sulfatos	1	250	1,655	0	0
Hierro Total	1,5	0,3	0,043	0	0
Cloruros	1	250	37,488	0	0
Nitratos	1	10	0	0	0
Nitritos	3	0,1	0	0	0
Aluminio (Al+3)	3	0,2		0	0
Fluoruros	1	1		0	0
COT	3	5		0	0
Coliformes Totales	15	0		0	0
Escherichia Coli	25	0	0	0	0
Sumatoria de puntajes asignados	100			VALOR IRCA	0

Fuente: Autores

Cálculo del IRCA
En la casilla <u>Valores reportados</u> , se ingresaron los resultados de los análisis de calidad del agua; si el valor reportado es mayor que el valor máximo aceptable, la planilla ubica un uno (1) en la casilla correspondiente en la columna Valores de cálculo, pero si el valor reportado es menor que el valor máximo aceptable, la planilla ubicara un cero (0) en la casilla correspondiente.

Cálculo de IRCA por muestra:

$$IRCA (\%) = \frac{\sum \text{Puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{Puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas}} * 100$$

El valor de IRCA es **cero (0)** puntos cuando cumple con los valores aceptables para cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas contempladas en la resolución 2115 de 2007 y cien puntos (100) para el más alto riesgo cuando no cumple ninguno de ellos.

ANEXO G. FICHA TÉCNICA DEL POLICLORURO DE ALUMINIO GRANULAR



QUIMICA INTEGRADA S.A.

NIT. 800.078.640-1

PLANTA: km. 34 Via Neiva - Bogotá • Aipe, Huila
CORRESPONDENCIA: Calle 8 No. 10 - 69 Neiva, Huila.
TELEFAX: 8389038, 8389327, 8389935, 8389224, 8389914
www.quinsa.com.co | e-mail: quinsa01@hotmail.com

POLICLORURO DE ALUMINIO GRANULAR

Este producto es un coagulante inorgánico macromolecular, ideal para tratar aguas severamente polubles tales como aguas de temperatura baja y de baja turbiedad, baja temperatura y alta turbiedad, con alto contenido de hierro y metales pesados.

FORMULA: $[Al_2(OH)_{nCl6-n}]_m$

ESPECIFICACIONES:

Aspecto	Grano color marrón
Densidad relativa	0.75 g/cm ³
Alúmina (Al ₂ O ₃)	Mínimo 30%
Hierro (Fe ₂ O ₃)	1%
Basicidad	55-90%
pH	3.5-5.0

PRESENTACIÓN: Granulado, en bultos de 25 Kg


APLICACIONES: Específicamente es usado como coagulante para clarificar aguas de consumo humano y tratar aguas residuales. Puede utilizarse como floculante en aguas de piscinas. Especial para aguas con alto contenido de Hierro y metales pesados.

ALMACENAMIENTO: Almacene en un lugar seco lejos de fuentes directas de calor. Prevenga el sobrecalentamiento. Asegúrese que los sacos estén sellados para prevenir absorción de humedad.

PRECAUCIONES PARA EL USO Y SEGURIDAD: Se requiere de gafas protectoras, guantes de Neopreno o plásticos. No es un producto tóxico, pero puede producir leve resequedad e irritación en la piel y ojos por tratarse de un producto de carácter ácido.

Fuente: www.quinsa.com.co

ANEXO H. FICHA TÉCNICA DEL HIPOCLORITO DE SODIO



HIPOCLORITO DE SODIO

Producto líquido transparente de color amarillo que a simple vista no presenta sedimento ni materia en suspensión, obtenido generalmente por disolución de cloro gaseoso en solución de soda cáustica.

SECTOR: productos químicos para uso industrial.

FORMULA: NaClO.

ESPECIFICACIONES:

Hipoclorito disponible (NaClO)	14.5 - 16.0 % p/v
Hipoclorito disponible (NaClO)	12.2 - 13.1 % p/p
Cloro disponible (Cl ₂)	13.8 - 15.2% p/v
Alcalinidad total (NaOH)	0.60 - 1.67 % p/v
Contenido de hierro (Fe)	2.0 mg/L máx.
Densidad (20°C)	1.19 - 1.23 g/ml

PRESENTACIÓN: Isotankes, tambores plásticos, garrafas y a granel.

USO DEL PRODUCTO: es usado en procesos de potabilización de aguas y limpieza de superficies por sus características oxidantes que actúan como fungicida y bactericida; es usado también como materia prima en la fabricación de blanqueadores.

ALMACENAMIENTO: Debe almacenarse en tanques o recipientes de fibra de vidrio, polipropileno o PVC con laminado interno, debidamente etiquetados, alejados de fuentes de calor y protegidos de la luz solar. Deben estar bien cerrados y sin goteo cuando no estén en uso. Los contenedores vacíos contienen residuos peligrosos. Debe ser almacenado en bodegas cerradas sobre estibas plásticas o de madera.

PRECAUCIONES PARA EL USO Y SEGURIDAD: para su manipulación se requiere de equipo de protección: Máscaras con cartucho antiácido, gafas protectoras, delantal plástico, guantes de caucho, nitrilo o neopreno y buena ventilación. No es un producto tóxico, pero es un irritante severo para la nariz, garganta y tracto respiratorio, por tratarse de una sal ácida.

Fuente: www.quinsa.com.co

ANEXO I. DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE DESINFECCIÓN

La concentración final de NaClO en <mg/L> utilizada para determinar la dosis adecuada en el proceso de desinfección, se determinó a partir de la siguiente ecuación, esto debido a que el NaClO se adquirió de forma comercial a una concentración del 15% y para realizar en ensayo fue necesario diluirlo con agua destilada.

$$[\text{NaClO}]_{\text{final}} = \frac{V_{\text{NaClO}} * [\text{NaClO}]_1}{V_{\text{H}_2\text{O destilada}}} = <\text{mg/L}>$$

Donde, V_{NaClO} es el volumen tomado en <L>, $[\text{NaClO}]_1$ es la concentración inicial en <mg/L> y $V_{\text{H}_2\text{O}}$ es el volumen de agua destilada en <L>.

$$[\text{NaClO}]_{\text{final}} = \frac{0,0001 \text{ L} * 158630,85 \text{ mg/L}}{1 \text{ L}} = 7,93 \text{ mg/L}$$

La siguiente tabla resume el cálculo mencionado anteriormente,

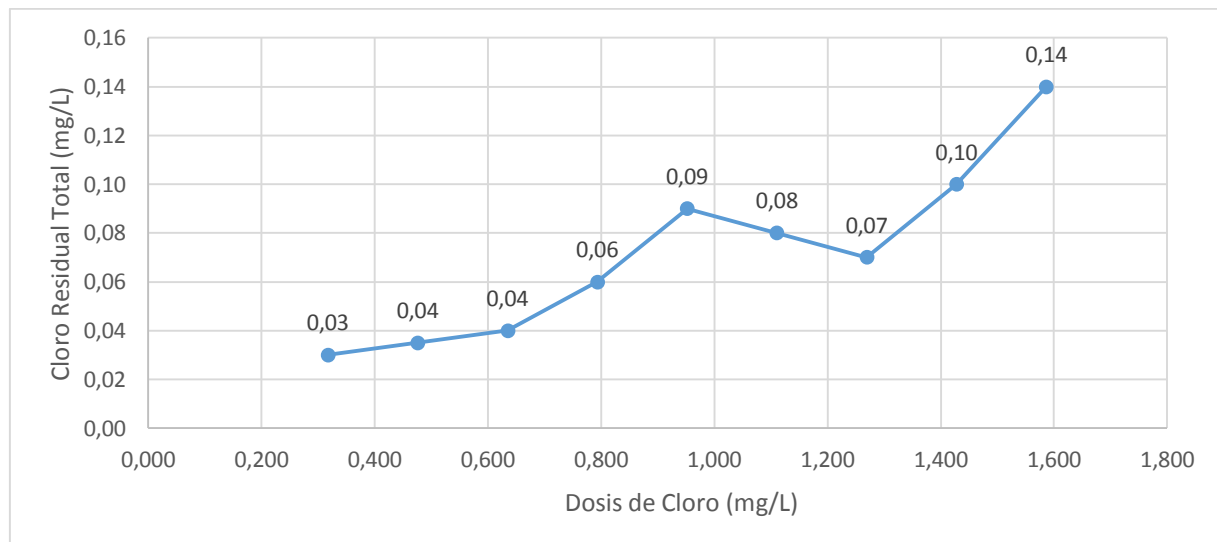
Tabla 41. Determinación Punto de Quiebre del Cloro

Determinación Punto de Quiebre del Cloro	
Concentración Hipoclorito de sodio ([NaClO] <%>	15%
Densidad del NaClO (ρ) <g/L>	1057,54
Concentración Hipoclorito de sodio ([NaClO]) <g/L>	158,631
Concentración Hipoclorito de sodio ([NaClO]) <mg/L>	158630,850
Volumen de NaClO inyectado (V ₁) <μl>	50,000
Volumen de NaClO inyectado (V ₁) <L>	0,0001
Volumen de agua destilada tomada (V _a) <L>	1,000
Concentración NaClO final ([NaClO]) <mg/L>	7,932

Fuente: Autores

Con la concentración obtenida se determinaron las dosis de NaClO para determinar la demanda de cloro a partir de la curva del punto de quiebre, como se ilustra en las siguientes gráficas.

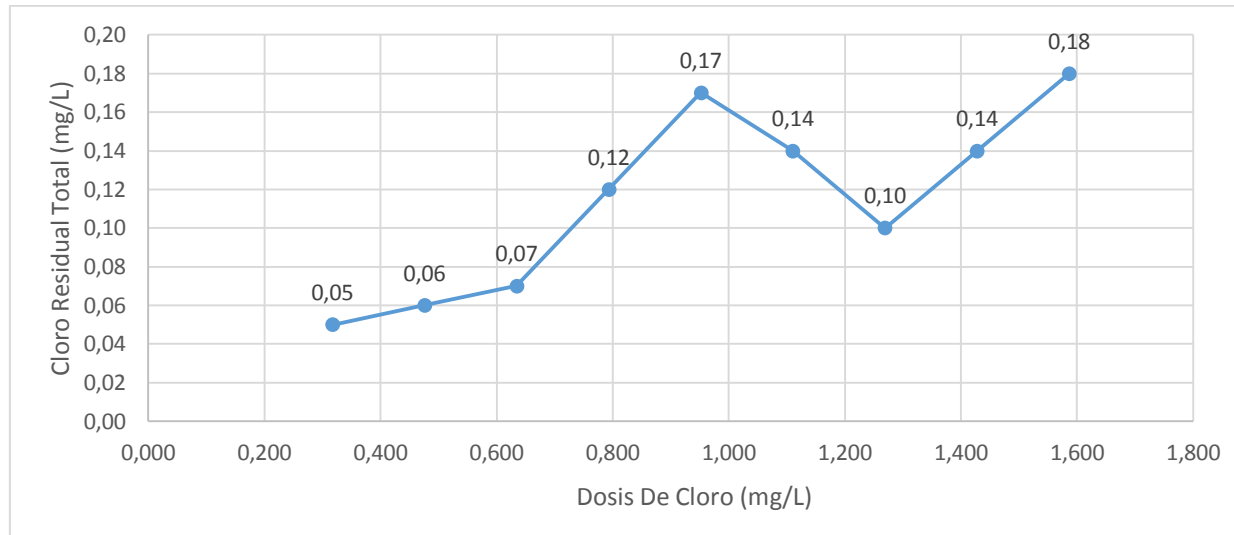
Tabla 42. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 1



Volumen de NaClO (mL)	Dosis de NaClO (mg/L)	Cloro Residual (mg/L)
1	0,317	0,03
1,5	0,476	0,04
2	0,635	0,04
2,5	0,793	0,06
3	0,952	0,09
3,5	1,110	0,08
4	1,269	0,07
4,5	1,428	0,10
5	1,586	0,14
V agua tratada <mL>		25

Fuente: Autores

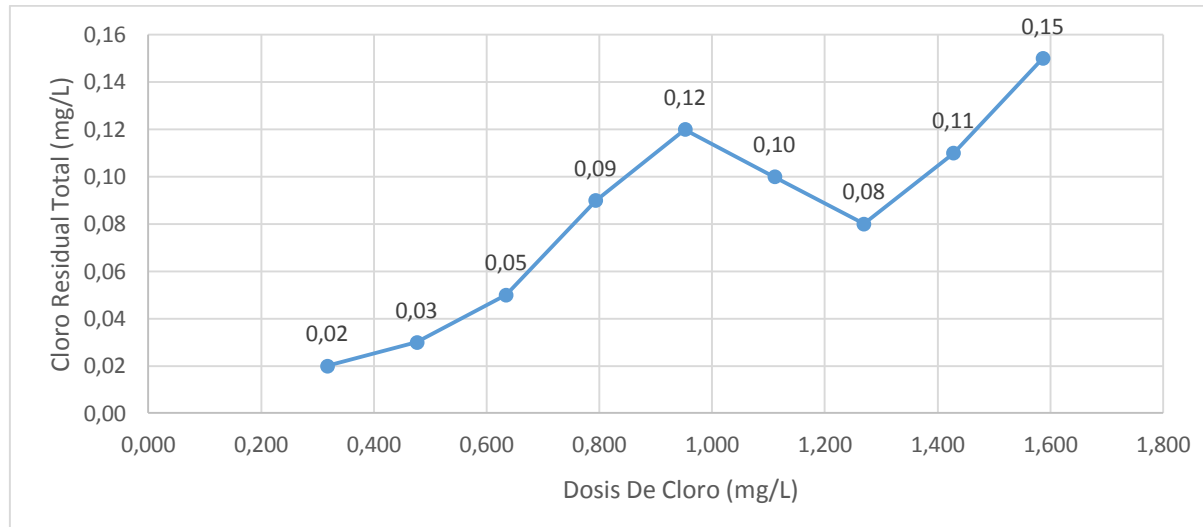
Tabla 43. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 2



Volumen de NaClO (mL)	Dosis de NaClO (mg/L)	Cloro Residual (mg/L)
1	0,3173	0,05
1,5	0,4759	0,06
2	0,6345	0,07
2,5	0,7932	0,12
3	0,9518	0,17
3,5	1,1104	0,14
4	1,2690	0,10
4,5	1,4277	0,14
5	1,5863	0,18
V agua tratada <mL>		25

Fuente: Autores

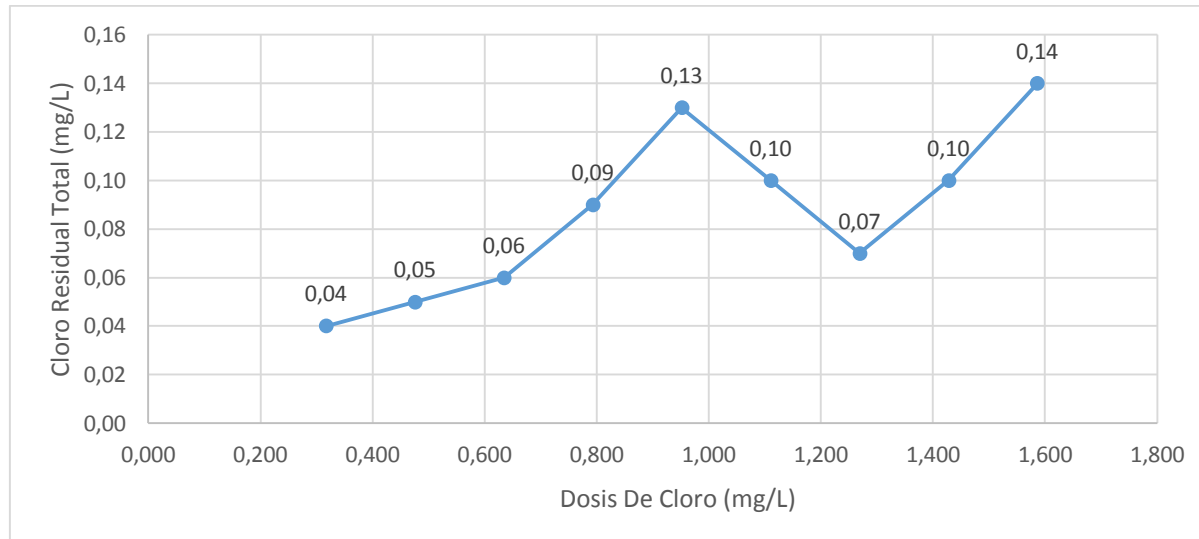
Tabla 44. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 3



Volumen de NaClO (mL)	Dosis de NaClO (mg/L)	Cloro Residual (mg/L)
1	0,3173	0,02
1,5	0,4759	0,03
2	0,6345	0,05
2,5	0,7932	0,09
3	0,9518	0,12
3,5	1,1104	0,10
4	1,2690	0,08
4,5	1,4277	0,11
5	1,5863	0,15
V agua tratada <mL>		25

Fuente: Autores

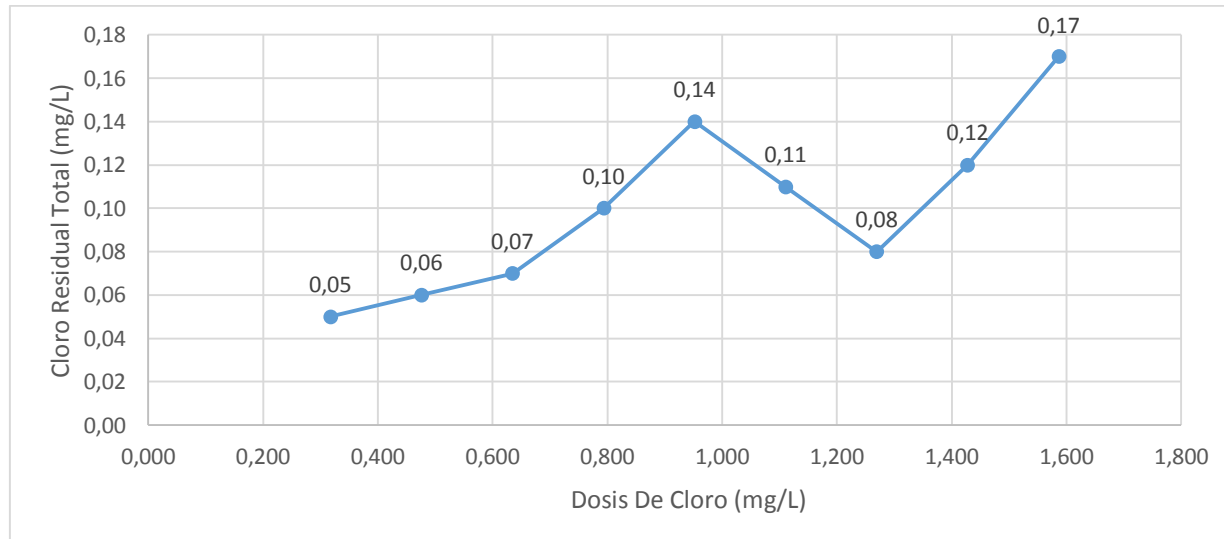
Tabla 45. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 4



Volumen de NaClO (mL)	Dosis de NaClO (mg/L)	Cloro Residual (mg/L)
1	0,3173	0,04
1,5	0,4759	0,05
2	0,6345	0,06
2,5	0,7932	0,09
3	0,9518	0,13
3,5	1,1104	0,10
4	1,2690	0,07
4,5	1,4277	0,10
5	1,5863	0,14
V agua tratada <mL>		25

Fuente: Autores

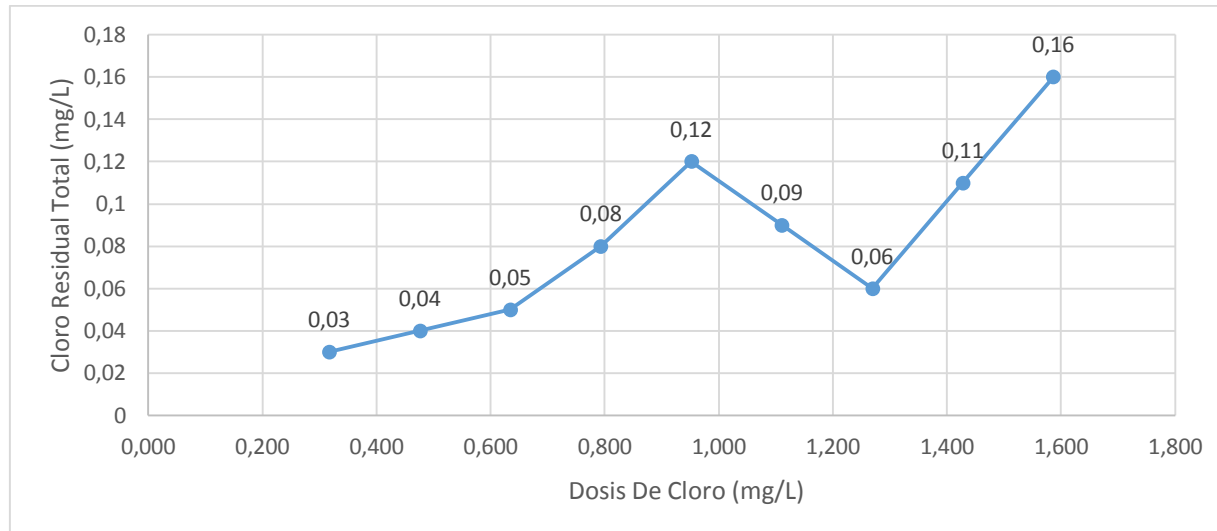
Tabla 46. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 5



Volumen de NaClO (mL)	Dosis de NaClO (mg/L)	Cloro Residual (mg/L)
1	0,3173	0,05
1,5	0,4759	0,06
2	0,6345	0,07
2,5	0,7932	0,10
3	0,9518	0,14
3,5	1,1104	0,11
4	1,2690	0,08
4,5	1,4277	0,12
5	1,5863	0,17
V agua tratada <mL>		25

Fuente: Autores

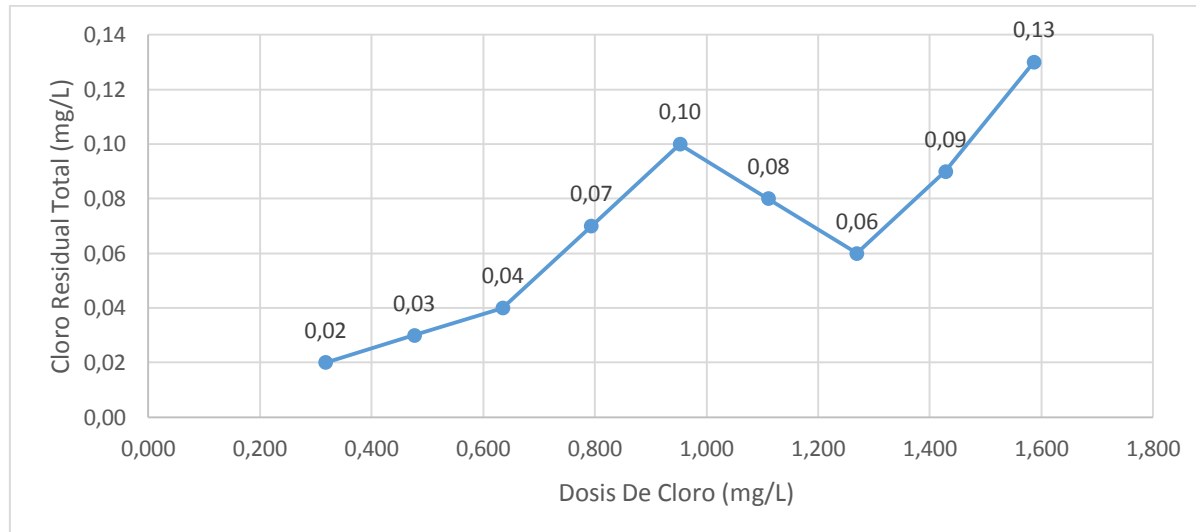
Tabla 47. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 6



Volumen de NaClO (mL)	Dosis de NaClO (mg/L)	Cloro Residual (mg/L)
1	0,3173	0,03
1,5	0,4759	0,04
2	0,6345	0,05
2,5	0,7932	0,08
3	0,9518	0,12
3,5	1,1104	0,09
4	1,2690	0,06
4,5	1,4277	0,11
5	1,5863	0,16
V agua tratada <mL>		25

Fuente: Autores

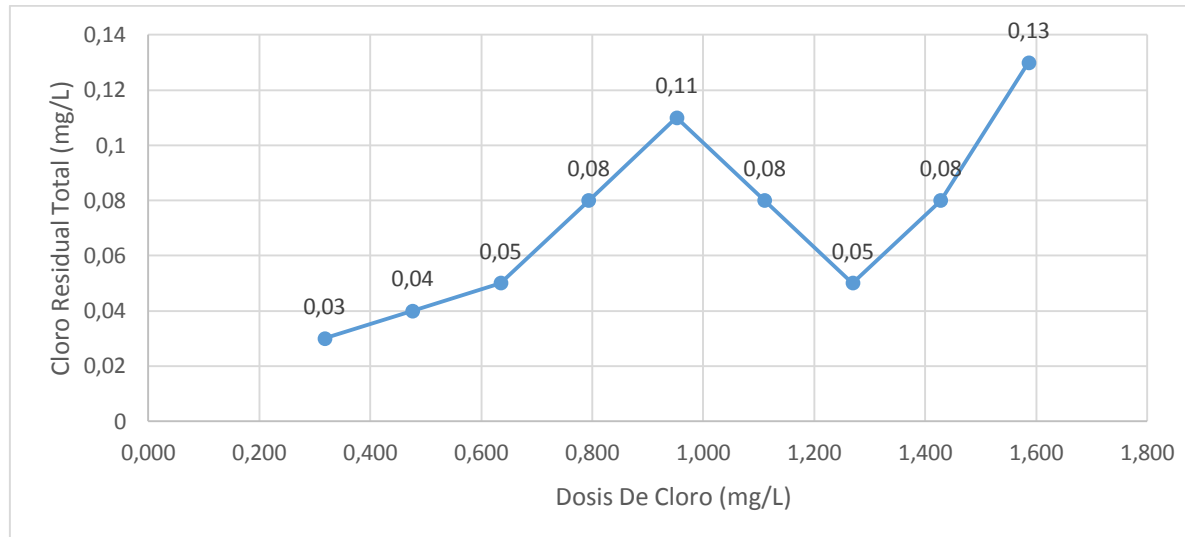
Tabla 48. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 7



Volumen de NaClO (mL)	Dosis de NaClO (mg/L)	Cloro Residual (mg/L)
1	0,3173	0,02
1,5	0,4759	0,03
2	0,6345	0,04
2,5	0,7932	0,07
3	0,9518	0,10
3,5	1,1104	0,08
4	1,2690	0,06
4,5	1,4277	0,09
5	1,5863	0,13
V agua tratada <mL>		25

Fuente: Autores

Tabla 49. Curva de demanda de cloro para la muestra de agua tratada 8



Volumen de NaClO (mL)	Dosis de NaClO (mg/L)	Cloro Residual (mg/L)
1	0,3173	0,03
1,5	0,4759	0,04
2	0,6345	0,05
2,5	0,7932	0,08
3	0,9518	0,11
3,5	1,1104	0,08
4	1,2690	0,05
4,5	1,4277	0,08
5	1,5863	0,13
V agua tratada <mL>		25

Fuente: Autores

ANEXO J. MEMORIA DE CÁLCULO

En las tablas, las casillas de color negro representan los datos fijados y las casillas de color rojo representan los datos que requieren formulas.

Demanda del recurso hídrico

A continuación se presentan los cálculos pertinentes para la determinación del caudal máximo diario, el cual es necesario en el desarrollo del sistema compacto, teniendo en cuenta lo establecido en el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS - 2000) título B.

Dotación neta

Para la fijación de la dotación neta (cantidad máxima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante sin considerar las pérdidas que ocurran en el sistema) se recurrió a los parámetros establecidos en el Resolución 2320 de 2009 de MAVDT; para el diseño del sistema compacto de potabilización se fijó una dotación neta máxima de **100 L/hab*día** para clima cálido correspondiente a un nivel de complejidad bajo.

Dotación bruta (Db)

La dotación bruta (Db) se determinó a partir de la siguiente ecuación; se fijó un 24% de pérdidas, teniendo en cuenta que este porcentaje (%p) no superará el 25% establecido en la Resolución 2320 de 2009.

$$Db = \frac{\text{Dotación Neta Máxima}}{1 - \%P} = < \text{L/hab} * \text{día} >$$
$$Db = \frac{100 \text{ L/hab} * \text{día}}{1 - 24\%} = 131,48 \text{ L/hab} * \text{día}$$

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene una dotación bruta de **131,48 L / hab*día**.

Caudal medio diario (Qmd)

La determinación del caudal medio diario (Qmd) se calculó teniendo en cuenta una población flotante en la Granja de 155 habitantes, a partir de la siguiente ecuación:

$$Qmd = \frac{Población (Hab) * Db}{86400} = < L/s >$$

$$Qmd = \frac{155 hab * 131,88 L/hab * día}{86400} = 0,236 L/s$$

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene un Qmd de **0,236 L/s**.

Caudal máximo diario (QMD)

El caudal máximo diario (QMD), correspondiente al consumo máximo registrado durante 24 horas durante un periodo de un año, se determinó teniendo en cuenta el coeficiente de consumo máximo diario (k_1) para un nivel de complejidad bajo, cuyo valor es 1,3 como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 50. Coeficiente de consumo máximo diario, k_1

Nivel de complejidad del sistema	K_1
Bajo	1,3
Medio	1,3
Medio bajo	1,2
Alto	1,2

Fuente: RAS 2000. Título B.

El QMD fue calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$QMD = Qmd * K_1 = < L/s >$$

$$QMD = 0,236 * 1,3 = 0,307 L/s$$

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene un QMD de **0,307 L/s**.

La tabla que se muestra enseguida resume los cálculos realizados para la determinación del caudal de diseño del sistema y los datos iniciales necesarios para diseñar el sistema compacto de potabilización.

Tabla 51. Datos iniciales para el diseño del sistema de potabilización

Datos Iniciales	
Dotación neta <L/hab*día>	100
Porcentaje de pérdida <%>	24%
Número de usuarios <hab>	155
Coeficiente de consumo máximo diario (k ₁) <>	1,3
Dotación bruta (Db) <L/hab*día>	131,486664
Caudal a tratar (Qmd) <L/día>	20380,432996
Caudal a tratar (Qmd) <m ³ /s>	0,000236
Caudal a tratar (Qmd) <L/s>	0,235885
Caudal máximo diario (QMD) <L/s>	0,306650
Caudal máximo diario (QMD) <m ³ /s>	0,000307

Fuente: Autores

Sistema de bombeo

Una vez determinado el caudal de agua a tratar, se procede a diseñar el sistema de bombeo por el cual se transportará el agua, desde el pozo artesanal hasta un tanque de almacenamiento para luego ingresar al sistema compacto.

En el diseño se tuvieron en cuenta las restricciones establecidas en el RAS 2000 – Título B.

Los datos que se muestran en la siguiente tabla son los requeridos para dimensionar el sistema de bombeo. Los datos de las cotas (donde se ubicará el sistema y donde se encuentra ubicado el pozo) fueron obtenidos de forma digital a partir de un perfil de elevación y corroborados en campo con ayuda de un GPS.

Tabla 52. Datos iniciales para el diseño del sistema de bombeo

Datos Iniciales	
Cota en la descarga <msnm>	384
Cota de la ubicación del pozo <msnm>	344
Número total de horas de bombeo al día	4
Caudal máximo diario (QMD) <L/s>	0,30665
Tubería PVC (C) <>	150
Número de bombas <>	1
Profundidad pozo <m>	5

Fuente: Autores

El sistema de bombeo fue diseñado con una sola bomba debido a la magnitud del proyecto; cabe aclarar, que para la puesta en marcha del sistema es necesario contar con dos bombas por cuestiones de mantenimiento y prevención. La tubería a usar es en PVC.

Tubería de impulsión

Inicialmente es necesario establecer el número de horas de bombeo al día y así determinar el porcentaje de utilización de la bomba requerido para calcular el caudal de diseño. Por ser una bomba que no se va a utilizar las 24 horas del día, el caudal de diseño se halló teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \% \text{ de utilización de la bomba } (X) &= \frac{\text{Número de bombeos por día}}{24 \text{ horas}} * 100 = \frac{4 \text{ horas}}{24 \text{ horas}} * 100 \\ &= 16,667 \% \end{aligned}$$

$$\text{Caudal de diseño } (Qd) = \frac{QMD}{X} = \frac{0,307 \text{ L/s}}{16,667 \%} = 1,840 \text{ L/s}$$

Para el cálculo del diámetro de impulsión se utilizó la ecuación de Bresse:

$$Di = 1,3 X^{\frac{1}{4}} \sqrt[4]{Qd} = 1,3 * (16,667\%)^{\frac{1}{4}} * \sqrt[4]{0,00184 \frac{m^3}{s}} = 0,036 \text{ m}$$

Donde, Di es el diámetro de impulsión en $\langle m \rangle$ y Qd es el caudal de diseño en $\langle m^3/min \rangle$.

El diámetro obtenido fue de 0,036 m equivalente a 1,403 in; se selecciona un diámetro de impulsión de **1 ½ in.**

Por tanto la velocidad en la tubería de impulsión está determinada por:

$$Vi = \frac{Qd}{A} = \langle m/s \rangle$$

Donde, Qd es el caudal de diseño en $\langle m^3/s \rangle$ y A es el área en $\langle m^2 \rangle$ y está dada por la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi * Di^2}{4} = < m^2 >$$

Donde, Di corresponde al diámetro en la tubería de impulsión en $<m>$ y π : 3,141592.

Reemplazando los datos en la ecuación se obtiene:

$$Vi = \frac{0,00184 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi * (0,038m)^2}{4}} = 1,614 \text{ m/s}$$

Que la velocidad de impulsión es de **1,614 m/s**. Valor que se encuentra dentro del rango establecido por el RAS 2000, entre 1 y 3 m/s.

Tubería de succión

El diámetro de la tubería de succión se fijó tomando un diámetro comercial mayor al de la tubería de impulsión (requisito establecido en el RAS 2000). En este caso, se seleccionó un diámetro de 2 in equivalente a 0,051 m.

Igual que en el cálculo de la velocidad de impulsión se determinó la velocidad de succión, verificando que esta no estuviese por debajo de 0,45 m/s. Por tanto, la velocidad en la tubería de succión es de **0,908 m/s**.

La sumergencia está dada por:

$$Sumergencia = 2,5 Ds + 0,1 = 2,5 * (0,051m) + 0,1 = \mathbf{0,227 \text{ m}}$$

Donde Ds corresponde al diámetro de succión en $<m>$.

Cálculo de la altura dinámica de elevación (Hd)

Pérdidas en la tubería de impulsión (hfi)

Las pérdidas en la tubería de impulsión se calcularon por longitudes equivalentes teniendo en cuenta el diámetro de impulsión y el tipo de accesorio requerido, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 53. Pérdidas en la impulsión

Pérdidas en la impulsión (Di= 1 ½" = 0,038 m)	
Accesorio	LE
Expansión concéntrica (1D) <m>	0,038
Válvula de retención horizontal tipo liviano	3,200
Válvula de cortina	0,300
Codo de radio largo 90º (7 codos)	6,300
Te bilateral	2,800
Longitud de tubería recta <m>	254,000
Longitud equivalente total <m>	266,638

Fuente: Autores

El cálculo de la longitud equivalente total corresponde a la sumatoria de las longitudes equivalentes de cada accesorio, incluido la longitud de la tubería recta siendo esta la distancia entre la bomba y el tanque de almacenamiento.

Una vez obtenida la longitud equivalente total se utilizó la fórmula de Hazen – Williams para determinar la pérdida que se genera en la impulsión. Esto es,

$$hfi = 10,64 * \frac{Qd^{1,85}}{C^{1,85} Di^{4,865}} * L = < m >$$

Donde, h_{fi} son las pérdidas en la impulsión en m , Q_d es el caudal de diseño en m^3/s , C corresponde al coeficiente de rugosidad para el tipo de tubería seleccionada (para tubería PVC este valor equivale a 150), D_i corresponde al diámetro interno de la tubería de impulsión en m y L es la longitud equivalente total en m .

Reemplazando los datos en la ecuación:

$$h_{fi} = 10,64 * \frac{(0,00184)^{1,85}}{(150)^{1,85} (0,038)^{4,865}} * 266,638 = 18,654 \text{ m}$$

Se obtiene que las pérdidas que se generan en la tubería de impulsión son de **18,654 m**.

Pérdidas en la tubería de succión (h_{fs})

Las pérdidas en la tubería de succión se calcularon igualmente por longitudes equivalentes, teniendo en cuenta esta vez el diámetro de succión y el tipo de accesorio requerido para este tramo, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 54. Pérdidas en la succión

Pérdidas en la succión ($D_s = 2" = 0,051 \text{ m}$)	
Accesorio	LE
Válvula de pie con coladera	14,000
Codo de radio largo a 90°	1,100
Reducción excéntrica (2D) m	0,102
Entrada (borda)	1,500
Longitud de tubería recta m	4,727
Longitud equivalente total m	21,429

Fuente: Autores

En este tramo la longitud de la tubería recta corresponde a la sumatoria de la sumergencia, la distancia de profundidad del tubo de succión en el pozo donde va a ser extraída el agua menos un metro de borde libre (4 m) y la altura de la ubicación de la bomba ($0,5\text{ m}$).

La pérdida generada en la succión se determinó de igual forma que la pérdida en la impulsión a partir de la fórmula de Hazen – Williams; dando como resultado **$0,370\text{ m}$** .

Altura estática (He)

La altura estática total corresponde a la sumatoria de la altura estática de impulsión (H_{ei}) y de succión (H_{es}); determinadas cada una por medio de las diferencias de niveles así:

$$H_{ei} = \text{Cota en la descarga} - \text{cota del eje de la bomba} = < \text{m} >$$

$$H_{es} = \text{Cota del eje de la bomba} - \text{cota del nivel mínimo} = < \text{m} >$$

Donde, la cota de descarga corresponde al valor en msnm donde se encuentra ubicado el tanque de almacenamiento; la cota del eje de la bomba corresponde al valor en msnm de la ubicación de la bomba en el terreno y la cota del nivel mínimo corresponde al nivel hasta donde se encuentra sumergido el tubo de succión.

Entonces,

$$H_{ei} = 384\text{ m} - 345\text{ m} = 39\text{ m}$$

$$H_{es} = 345\text{ m} - 340\text{ m} = 5\text{ m}$$

Sumando los valores se obtiene una altura estática total de **44 m** .

Altura de velocidad en la descarga

Se determinó a partir de la siguiente ecuación, teniendo en cuenta la velocidad de impulsión y el valor de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$):

$$\frac{V_i^2}{2g} = \frac{(1,614 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,132 \text{ m}$$

Donde, V_i es la velocidad de impulsión en m/s y g es el valor de la aceleración de la gravedad en m/s^2 .

Una vez obtenidas las pérdidas en la impulsión y succión, la altura estática y la altura de velocidad en la descarga se procedió a calcular la altura dinámica de la siguiente forma:

$$\text{Altura Dinamica (Hd)} = H_e + h_{fi} + h_{fs} + \frac{V_i^2}{2g} = < m >$$

Donde, H_e es la altura estática en m , h_{fi} corresponde a las pérdidas en la tubería de impulsión en m , h_{fs} son las pérdidas en la tubería de succión en m .

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$H_d = 44 \text{ m} + 18,654 \text{ m} + 0,370 \text{ m} + 0,132 \text{ m} = 63,156 \text{ m}$$

Se obtiene una altura dinámica de elevación de **63,156 m**.

La tabla que se presenta enseguida resume los cálculos realizados para la determinación de la altura dinámica.

Tabla 55. Cálculo de la altura dinámica

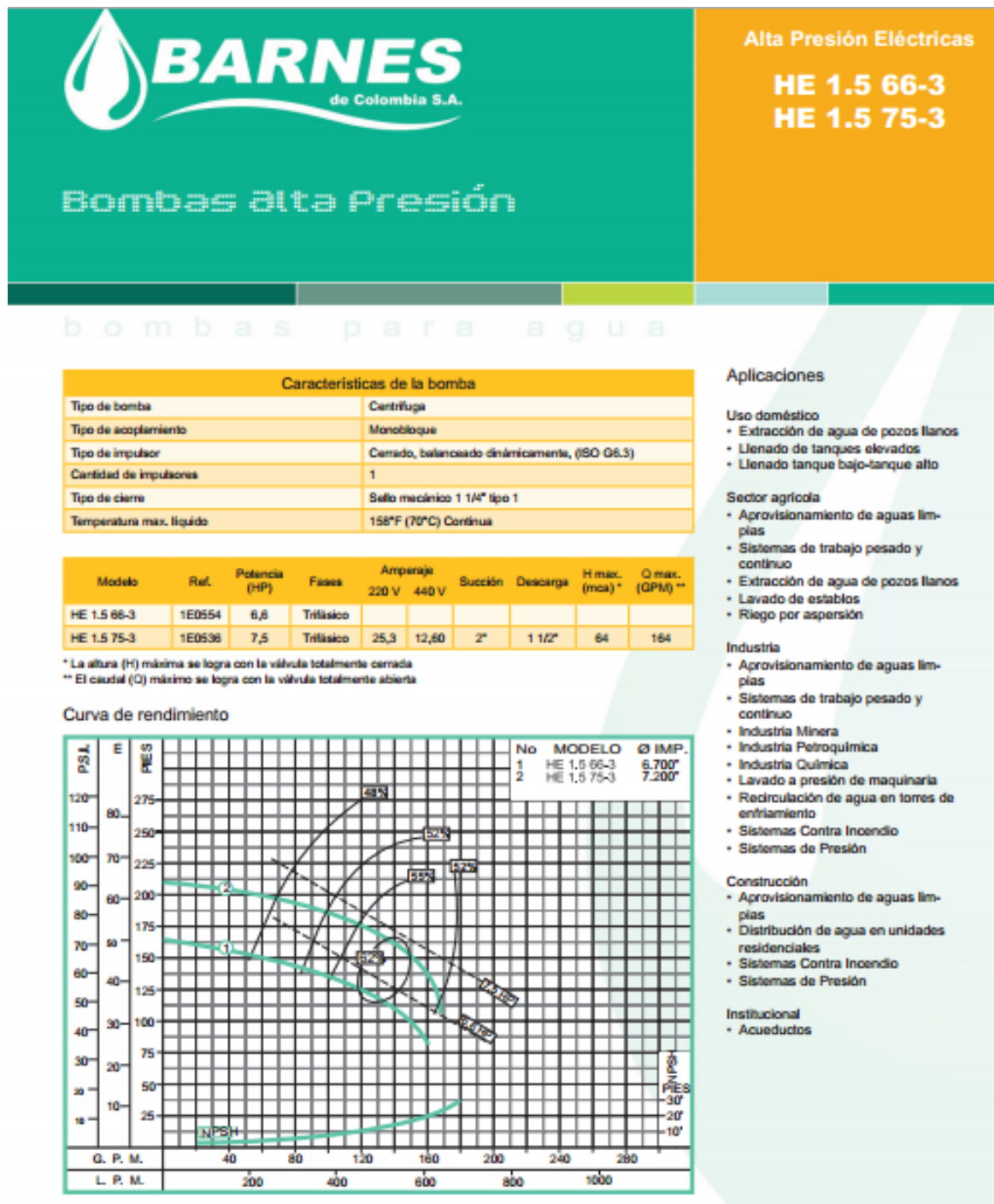
Cálculo de la Altura dinámica		
% de utilización de la bomba	16,667	
Caudal de diseño (Qd) < L/s>	1,840	
Caudal de diseño para 1 bomba (Qd) < L/s>	1,840	
Diámetro de impulsión (Di) <m>	0,036	
Diámetro de impulsión (Di) <in>	1,403	
Diámetro de impulsión seleccionado (Di) <in>	1,500	
Diámetro de impulsión seleccionado (Di) <m>	0,038	
Velocidad de impulsión (Vi) <m/s>	1,614	Rango < 1-3 m/s >
Diámetro de succión (Ds) <in>	2,000	Ds > Di
Diámetro de succión (Ds) <m>	0,051	
Velocidad de succión (Vs) <m/s>	0,908	Vs mínima: 0,45 m/s
Sumergencia (S) <m>	0,227	
Pérdidas en la impulsión (hfi) <m>	18,654	
Pérdidas en la succión (hfs) <m>	0,370	
Altura estática (He) <m>	44,000	
Altura de velocidad en la descarga <m>	0,133	
Altura dinámica (Hd) <m>	63,156	

Fuente: Autores

Cálculo de la potencia de la bomba

Con el caudal de diseño (110,4 L/min) y la altura dinámica (63,156 m) se realizó la selección de la bomba por medio de las curvas características suministradas por los fabricantes. Se seleccionó una bomba tipo centrífuga perteneciente a la empresa BARNES de Colombia S.A. y se determinó la eficiencia de la misma. La información del tipo de bomba seleccionada se encuentra a continuación:

Imagen 19. Bomba comercial seleccionada



Aplicaciones

Uso doméstico

- Extracción de agua de pozos llanos
- Llenado de tanques elevados
- Llenado tanque bajo-tanque alto

Sector agrícola

- Aprovechamiento de aguas limpias
- Sistemas de trabajo pesado y continuo
- Extracción de agua de pozos llanos
- Lavado de establos
- Riego por aspersión

Industria

- Aprovechamiento de aguas limpias
- Sistemas de trabajo pesado y continuo
- Industria Minera
- Industria Petroquímica
- Industria Química
- Lavado a presión de maquinaria
- Reducción de agua en torres de enfriamiento
- Sistemas Contra Incendio
- Sistemas de Presión

Construcción

- Aprovechamiento de aguas limpias
- Distribución de agua en unidades residenciales
- Sistemas Contra Incendio
- Sistemas de Presión

Institucional

- Acueductos

Fuente: <http://www.barnes.com.co/>

La tabla que se muestra enseguida representa los datos de la curva de rendimiento del tipo de bomba seleccionada.

Tabla 56. Curva característica de la bomba

Curva característica de la bomba	
Q Bomba <L/min>	Hd Bomba <m>
92,00	63,70
100,00	62,80
106,00	62,00
113,00	61,30
119,00	60,80
126,00	60,30

Fuente: Autores

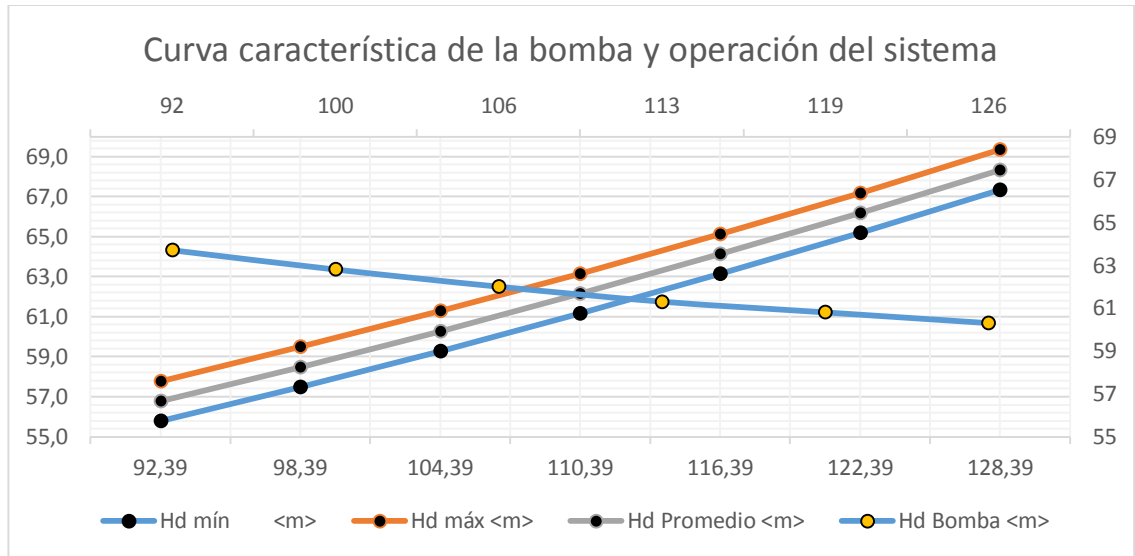
Con el fin de verificar que el caudal de diseño se encuentre entre el rango de operación, se establecieron las condiciones de operación del sistema de bombeo, logradas determinado la curva de operación del sistema para niveles máximo y mínimos y para diferentes caudales (superiores e inferiores al Qd). Repitiendo los cálculos realizados anteriormente se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 57. Curva de operación del sistema

Curva de operación del sistema (Di= 1 ½" = 0,038 m).							
Q	Pérdidas <m>		Altura	Altura estática		Altura dinámica	
<m³/s>	Succión	Impulsión	Vel. <m>	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
0,000000	0,000	0,000	0,000	42,000	44,000	42,000	44,000
0,001540	0,266	13,420	0,093	42,000	44,000	55,779	57,779
0,001640	0,299	15,077	0,106	42,000	44,000	57,481	59,481
0,001740	0,334	16,822	0,119	42,000	44,000	59,274	61,274
0,001840	0,370	18,654	0,133	42,000	44,000	61,156	63,156
0,001940	0,408	20,572	0,148	42,000	44,000	63,128	65,128
0,002040	0,448	22,577	0,163	42,000	44,000	65,188	67,188
0,002140	0,489	24,667	0,180	42,000	44,000	67,336	69,336

Fuente: Autores

Grafica 12. Curva característica de la bomba y operación del sistema



Fuente: Autores

La grafica ilustra las curvas características de la bomba y del sistema, en donde se demuestra el punto óptimo en el cual el caudal del sistema se encuentra dentro del margen del rendimiento operacional de la bomba.

Una vez verificados los valores y obtenida la eficiencia de la bomba (48%) se calculó la potencia de la misma de la siguiente forma:

$$Potencia\ bomba = \frac{\gamma * Qd * Hd}{e} = < kW >$$

Donde, γ corresponde al peso específico del agua equivalente a $9,81\text{ kN/m}^3$; Qd es el caudal de diseño en m^3/s ; Hd en la altura dinámica en m y e es la eficiencia de la bomba obtenida a partir de la curva característica.

Por tanto,

$$Potencia\ bomba = \frac{9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,00184 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 63,256\text{m}}{48\%} = 2,375\text{ kW}$$

La potencia de la bomba requerida para suministrar un caudal de 1,840 L/s es de 2,375 kW equivalente a **3,185 hp**.

Para evitar posible recalentamientos y tener en cuenta las perdidas mecánicas de transmisión de energía se recomienda aumentar la potencia del motor en 1,15 veces su potencia. Por tanto, la potencia de la bomba sería 3,525 kW equivalente a **4,727 hp**.

La tabla que se muestra enseguida resume los cálculos realizados para determinar la potencia de la bomba.

Tabla 58. Cálculo de la potencia de la bomba

Cálculo de la potencia de la bomba	
Eficiencia de la bomba (e) <%>	0,480
Potencia de la bomba (P) <Kw>	2,375
Potencia de la bomba (P) <hp>	3,185
Potencia de la bomba final(P) <Kw>	3,525
Potencia de la bomba (P) <hp>	4,727

Fuente: Autores

Finalmente, el agua cruda proveniente del pozo de succión es almacenada en un tanque de almacenamiento con un volumen mínimo de **26,495 m³**.

Diseño del coagulador helicoidal

Para el diseño del coagulador, es necesario establecer como parámetros iniciales el caudal máximo diario y el tiempo de retención obtenido a partir del ensayo de jarras (45 segundos). A continuación se muestra un paso a paso de los cálculos realizados para el diseño del coagulador así como el del hidrociclón.

Determinación del caudal de dosificación del PAC

El Caudal de PAC a dosificar en el sistema compacto de potabilización se determinó a partir de la dosis óptima. Esto es:

$$Q_D = \frac{D_{PAC} * QMD}{C_{PAC}} = < m^3/d >$$

Donde, D_{PAC} es la dosis óptima del coagulante en $<mg/L>$, QMD es el caudal máximo diario en $<m^3/s>$ y C_{PAC} es la concentración del PAC en $<mg/L>$.

$$Q_D = \frac{15 \text{ mg/L} * 26,49 \text{ m}^3/d}{10000 \text{ mg/L}} = 0,039 \text{ m}^3/d$$

El caudal de PAC a dosificar en el sistema es de **0,039 m³/d**.

En la siguiente tabla se observa un resumen del cálculo realizado.

Tabla 59. Determinación del caudal de dosificación de PAC

Determinación del caudal de dosificación del coagulante	
Caudal máximo diario (QMD) <m³/d>	26,4946
Volumen de PAC suministrado (V) <mL>	0,75
Volumen de agua cruda (V) <mL>	500
Concentración del PAC <%>	1
Concentración del PAC ([PAC]) <mg/L>	10000
Dosis óptima del PAC <mg/L>	15,00
Volumen del tanque de almacenamiento (ϑ) <m³>	0,0397
Caudal de dosificación de PAC (QD) <m³/d>	0,0397
Caudal de dosificación de PAC (QD) <L/h>	1,6559

Fuente: Autores

Diseño del hidrociclón

Volumen del hidrociclón (ϑct)

El volumen del hidrociclón se calculó a partir de la siguiente ecuación, fijando un diámetro en la tubería de 1 ½" y una altura para el equipo de 0,40 m.

$$\vartheta H = \left(\frac{1}{3} \pi H \right) * \left(R H^2 + r H^2 + \sqrt{R H^2 r H^2} \right) = < m^3 >$$

Donde, π : 3,141592, H es la altura del hidrociclón en <m>, R_H es el radio superior del hidrociclón en <m>, r_H es el radio inferior del hidrociclón en <m>.

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$\vartheta H = \left(\frac{1}{3} \pi 0,40 \text{ m} \right) * \left((0,064)^2 + (0,031)^2 + \sqrt{(0,064)^2 (0,031)^2} \right) = 0,0029 \text{ m}^3$$

Se obtiene que el volumen del hidrociclón es de **0,0029 m³**.

La tabla que se muestra a continuación contiene un resumen del cálculo realizado para el volumen del hidrociclón, así como los datos fijados.

Tabla 60. Diseño del hidrociclón

Diseño hidrociclón	
Diámetro tubo lateral (Di) <in>	1,5
Diámetro tubo lateral (Di) <m>	0,0381
Radio superior hidrociclón (RH) <in>	2,5
Radio superior hidrociclón (RH) <m>	0,0635
Radio inferior hidrociclón (rH) <in>	1,25
Radio inferior hidrociclón (rH) <m>	0,03175
Altura hidrociclón (H) <m>	0,4
Volumen hidrociclón (ϑ_H) <m ³ >	0,00296

Fuente: Autores

Altura del coagulador (Hc)

Para determinar la altura del coagulador es necesario conocer previamente las alturas del floculador y del sedimentador (los cálculos de las alturas se encontrarán más adelante en el diseño del floculador y sedimentador); esto, debido a que el principio del sistema compacto en un solo volumen converjan estos tres procesos, lo que los hace dependientes.

$$H_c = H_f + H_s = < m >$$

Donde, H_c es la altura mínima del coagulador en <m>; H_f corresponde a la altura del floculador en <m> y H_s a la altura del Sedimentador en <m>.

Al reemplazar los datos en la ecuación,

$$H_c = 3,223 \text{ m} + 1,155 = 4,378 \text{ m}$$

Se obtiene que la altura mínima requerida del coagulador helicoidal es **4,378 m**.

Volumen del coagulador (ϑ)

El volumen necesario para generar una mezcla rápida capaz de dispersar el coagulante en el tiempo requerido por el proceso, se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$\vartheta = QMD * t = < m^3 >$$

Donde, ϑ es el volumen del coagulador en $<m^3>$; QMD es el caudal máximo diario en $<m^3/s>$ y t corresponde al tiempo de retención fijado en $<s>$.

Al reemplazar los valores en la ecuación,

$$\vartheta = 0,000307 \frac{m^3}{s} * (45 s) = 0,0138 m^3$$

Se obtiene un volumen de **0,0138 m³**.

Diámetro del coagulador (\varnothing_c)

El diámetro del coagulador se calcula de la siguiente manera teniendo en cuenta el volumen y la altura del mismo.

$$\varnothing_c = \sqrt{\frac{4 * \vartheta}{\pi * H_c}} = < m >$$

Donde, \varnothing_c es el diámetro del coagulador en $<m>$; ϑ es el volumen del coagulador en $<m^3>$; π : 3,141592 y H_c es la altura mínima del coagulador en $<m>$.

Al reemplazar los valores en la ecuación,

$$\varnothing_c = \sqrt{\frac{4 * 0,0138 m^3}{\pi * 4,378 m}} = 0,063 m$$

Se obtiene un diámetro de $0,063 \text{ m}$ equivalente a $2,494 \text{ in}$; se selecciona un diámetro comercial de **2,5 in**.

Velocidad (V)

La velocidad durante el proceso se calculó de la siguiente manera:

$$v = \frac{QMD}{At} = < \text{m/s} >$$

Donde, V corresponde a la velocidad en $<\text{m/s}>$; QMD es el caudal máximo diario en $<\text{m}^3/\text{s}>$ y At es el área transversal en $<\text{m}^2>$ calculada de la siguiente manera:

$$At = \pi * \frac{\emptyset c^2}{4} = < \text{m}^2 >$$

Donde, π : 3,141592 y $\emptyset c$ es el diámetro del coagulador en $<\text{m}>$.

Reemplazando los datos en la ecuación anterior,

$$At = \pi * \frac{(0,063)^2}{4} = 0,003 \text{ m}^2$$

Se obtiene un área transversal de **0,003 m²**; reemplazada en la ecuación de velocidad,

$$v = \frac{0,000307 \text{ m}^3/\text{s}}{0,003 \text{ m}^2} = 0,097 \text{ m/s}$$

Se obtiene una velocidad de **0,097 m/s**.

Pérdida por fricción (hf)

La pérdida de energía debida a la fricción que existe entre el agua y la pared de la tubería está determinada por la siguiente ecuación:

$$hf = \frac{v^2 * Hc}{(Rh)^{\frac{4}{3}}} = < m >$$

Donde, hf es la pérdida por fricción en $<m>$; V es la velocidad en $<m/s>$; Hc es la altura mínima del coagulador en $<m>$; Rh es el radio hidráulico en $<m>$.

Perímetro húmedo (Ph)

El perímetro de la sección transversal del conducto, en donde hay contacto entre el agua y la pared se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$Ph = 2 * \pi * \frac{\emptyset c}{2} = < m >$$

Donde, π : 3,141592 y $\emptyset c$ es el diámetro del coagulador en $<m>$.

Reemplazando en la ecuación,

$$Ph = 2 * \pi * \frac{0,063 \text{ m}}{2} = 0,199 \text{ m}$$

Se obtiene un ph de **0,199 m**.

El radio hidráulico (Rh) se calculó teniendo en cuenta que es la relación entre el área transversal y el perímetro húmedo así:

$$Rh = \frac{At}{Ph} = < m >$$

Donde, Rh es el radio hidráulico en $<m>$; At es el área transversal en $<m^2>$ y Ph es el perímetro húmedo en $<m>$.

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$Rh = \frac{0,003 \text{ m}^2}{0,199 \text{ m}} = 0,016 \text{ m}$$

Se obtiene un Rh de **0,016 m**.

Entonces, reemplazando los datos en la ecuación inicial,

$$h_f = \frac{(0,097)^2 * 4,378 \text{ m}}{(0,016)^{\frac{4}{3}}} = 10,287 \text{ m}$$

Se obtiene que las pérdidas equivalentes en m que se pierden durante el proceso son de **10,287 m**.

Pérdida Sumergible (h_s)

Como el coagulador se encuentra sumergido dentro del floculador y sedimentador fue necesario establecer las pérdidas que se presentan por este fenómeno;

$$h_s = \frac{v^2}{2 * g} = < \text{m} >$$

Donde, h_s es la pérdida sumergible en $<\text{m}>$, V es la velocidad en $<\text{m/s}>$ y g corresponde a la aceleración de la gravedad equivalente a $9,81 \text{ m/s}^2$.

Reemplazando los datos en la ecuación,

$$h_s = \frac{(0,097 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,0005 \text{ m}$$

Se obtienen pérdidas sumergibles de **0,0005 m**.

Gradiente de mezcla (G)

El gradiente de mezcla óptimo calculado en función de las pérdidas totales y el tiempo de retención se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * ht}{\mu * t}} = < s^{-1} >$$

Donde, G es el Gradiente de mezcla en $< s^{-1} >$; γ es el peso específico del agua en $< Kg/m^2 s^2 >$; ht son las pérdidas Totales en $< m >$; μ es la viscosidad dinámica del agua en $< N s/m^2 >$ y t corresponde al tiempo de retención en $< S >$.

Las pérdidas totales corresponde a la sumatoria entre las pérdidas por fricción y las pérdidas sumergibles que se dan en el proceso; esto es:

$$ht = hf + hs = < m >$$

$$ht = 10,287 \text{ m} + 0,0005 \text{ m} = 10,2876 \text{ m}$$

Reemplazando los datos en la siguiente ecuación,

$$G = \sqrt{\frac{9810 \text{ kg/m}^2 \text{ s} * 10,2876 \text{ m}}{0,0010 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} * 45 \text{ s}}} = 1497,560 \text{ S}^{-1}$$

Se obtiene un gradiente de mezcla óptimo de **1497,560 s⁻¹**. El cual se encuentra dentro del rango, entre 1000 y 2000 s⁻¹.

La tabla que se muestra enseguida contiene un resume de los cálculos realizados anteriormente para el diseño de un coagulador helicoidal.

Tabla 61. Diseño del coagulador helicoidal

Coagulador helicoidal	
Densidad (ρ) <Kg/m ³ >	1000,0000
Aceleración de la gravedad (g) <m/s ² >	9,8100
Viscosidad Dinámica (μ) <N s/m ² >	0,0010
Tiempo de retención (t) <min>	0,7500
Altura mínima del coagulador (Hc) <m>	4,3776
Volumen del coagulador (ϑ) <m ³ >	0,0138
Diámetro del coagulador (ϕ c) <m>	0,0634
Diámetro del coagulador (ϕ c) <in>	2,4942
Diámetro del coagulador seleccionado (ϕ c) <in>	2,5000
Diámetro del coagulador seleccionado (ϕ c) <m>	0,0635
Área transversal (At) <m ² >	0,0032
Perímetro húmedo (Ph) <m>	0,1995
Velocidad (V) <m/s>	0,0968
Radio hidráulico (Rh) <m>	0,0159
Pérdida por fricción (hf) <m>	10,2871
Pérdida Sumergible (hs) <m>	0,0005
Pérdidas Totales (ht)<m>	10,2876
Peso específico (γ) <Kg/m ² s ² >	9810,0000
Gradiente (G) <s-1>	1497,5604

Fuente: Autores

Diseño del floculador helicoidal

Una vez se han desestabilizados los coloides (proceso de coagulación) se debe generar una mezcla suave que permita una aglomeración y crecimiento de los flocs formados sin que se genere un rompimiento de los mismos, esto se logra a partir de un incremento con relación al diámetro de coagulación. El gradiente de mezcla óptimo para que se produzca este fenómeno, así como el volumen y la altura del floculador se calculan fijando un diámetro y un tiempo de retención (obtenido en los ensayos de jarras realizados). Los cálculos que se muestran a continuación corresponden a un floculador hidráulico de flujo helicoidal.

Volumen del floculador (ϑ)

El volumen del floculador se determinó a partir de la siguiente ecuación, tomando un tiempo de retención de 15 min (900 s) obtenido a partir de los ensayos de jarras.

$$\vartheta = QMD * t = < m^3 >$$

Donde, ϑ es el volumen del floculador en $<m^3>$, QMD es el caudal máximo diario en $<m^3/s>$ y t es el tiempo de retención en $<s>$.

Al reemplazar los valores en la ecuación,

$$\vartheta = 0,000307 \frac{m^3}{s} * (900 s) = 0,276 m^3$$

Se obtiene un volumen de $0,276 m^3$.

Altura del floculador (H_f)

La altura del floculador se determinó a partir de la siguiente ecuación, fijando un diámetro de 13 in, equivalente a 0,33 m.

$$Hf = \frac{4 * \vartheta}{\pi * \phi f} = < m >$$

Donde, Hf corresponde a la altura del floculador en $<m>$, ϑ es el volumen del floculador en $<m^3>$, π : 3,141592 y ϕf es el diámetro del floculador en $<m>$.

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$Hf = \frac{4 * 0,276 \text{ m}^3}{\pi * 0,33 \text{ m}} = 3,223 \text{ m}$$

Se obtiene que la altura del floculador es de **3,223 m**.

Para evitar que los lodos generados durante el proceso de tratamiento se mezclen con el proceso de floculación se deja un borde libre de 3 cm. Lo que quiere decir, que la altura real del floculador corresponde a la sumatoria de la altura del floculador (Hf) y el borde libre (bl). Esto es,

$$Hrf = Hf + bl = < m >$$

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$Hrf = 3,223 \text{ m} + 0,03 \text{ m} = 3,253 \text{ m}$$

Se obtiene que la altura real del floculador es de **3,253 m**.

Pérdida por fricción (hf)

La pérdida de energía debida a la fricción que existe entre el agua y la pared de la tubería está determinada por la siguiente ecuación:

$$hf = \frac{v^2 * Hrf}{(Rh)^{\frac{4}{3}}} = < m >$$

Donde, h_f es la pérdida por fricción en $\langle m \rangle$, V es la velocidad de ascenso en $\langle m/s \rangle$, H_c es la altura real del floculador en $\langle m \rangle$ y R_h es el radio hidráulico en $\langle m \rangle$.

Velocidad de ascenso (V)

La velocidad de ascenso durante el proceso se calculó de la siguiente manera:

$$v = \frac{QMD}{At} = \langle m/s \rangle$$

Donde, V corresponde a la velocidad en $\langle m/s \rangle$, QMD es el caudal máximo diario en $\langle m^3/s \rangle$ y At es el área transversal en $\langle m^2 \rangle$, calculada de la siguiente manera:

$$At = \pi * \frac{\emptyset f^2}{4} = \langle m^2 \rangle$$

Donde, At es el área transversal en $\langle m^2 \rangle$, π : 3,141592 y $\emptyset f$ es el diámetro del floculador en $\langle m \rangle$.

Reemplazando los datos en la ecuación anterior,

$$At = \pi * \frac{(0,33 \text{ m})^2}{4} = 0,086 \text{ m}^2$$

Se obtiene un área transversal de $0,086 \text{ m}^2$; reemplazada en la ecuación de la velocidad de ascenso,

$$v = \frac{0,000307 \text{ m}^3/s}{0,086 \text{ m}^2} = 0,04 \text{ m/s}$$

Se obtiene una velocidad de **0,04 m/s**.

Perímetro húmedo (Ph)

El perímetro de la sección transversal del conducto, en donde hay contacto entre el agua y la pared se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$Ph = 2 * \pi * \frac{\varnothing f}{2} = < m >$$

Donde, Ph es el perímetro húmedo en <m>, π : 3,141592 y $\varnothing f$ es el diámetro del floculador en <m>.

Reemplazando en la ecuación,

$$Ph = 2 * \pi * \frac{0,33 \text{ m}}{2} = 1,037 \text{ m}$$

Se obtiene un ph de **1,037 m**.

El radio hidráulico (Rh) se calculó teniendo en cuenta que es la relación entre el área transversal y el perímetro húmedo así:

$$Rh = \frac{At}{Ph} = < m >$$

Donde, Rh es el radio hidráulico en <m>; At es el área transversal en <m²> y Ph es el perímetro húmedo en <m>.

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$Rh = \frac{0,086 \text{ m}^2}{1,037 \text{ m}} = 0,083 \text{ m}$$

Se obtiene un Rh de **0,083 m**.

Entonces, reemplazando los datos en la ecuación inicial,

$$hf = \frac{(0,04)^2 * 3,253 \text{ m}}{(0,083)^{\frac{4}{3}}} = 0,001 \text{ m}$$

Se obtiene que las perdidas equivalentes en m que se pierden durante el proceso son de **0,001 m**.

Gradiente de velocidad (G)

El gradiente de velocidad óptimo calculado en función de las pérdidas por fricción y el tiempo de retención se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$G = \sqrt{\frac{g * hf}{\nu * t}} = < s^{-1} >$$

Donde, G es el gradiente de velocidad en $<s^{-1}>$, g es la aceleración de la gravedad en $<m/seg^2>$ equivalente a $9,81 \text{ m/seg}^2$, hf corresponde a la pérdida por fricción en $<m>$, ν es la Viscosidad Cinemática en $<m^2/s>$ y t es el tiempo de retención en $<s>$.

Reemplazando los datos en la siguiente ecuación,

$$G = \sqrt{\frac{9,81 \text{ m/s}^2 * 0,001 \text{ m}}{0,0000010 \text{ m}^2/\text{s} * 900 \text{ s}}} = 3,557 \text{ s}^{-1}$$

Se obtiene un gradiente de velocidad óptimo de **3,557 s^{-1}** .

La tabla que se muestra enseguida contiene un resume de los cálculos realizados anteriormente para el diseño de un floculador de flujo helicoidal.

Tabla 62. Diseño del floculador helicoidal

Floculador helicoidal	
Tiempo de retención (t) <min>	15,000
Diámetro del floculador (ϕ_f) <in>	13,000
Viscosidad Cinemática (ν) <m ² /s>	1,00E-06
Aceleración de la gravedad (g) <m/s ² >	9,810
Volumen del floculador (Ψ) <m ³ >	0,276
Diámetro del floculador (ϕ_c) <m>	0,330
Altura del floculador (Hf) <m>	3,223
Altura real del floculador (Hrf) <m>	3,253
Perímetro húmedo (Ph) <m>	1,037
Área transversal (At) <m ² >	0,086
Radio hidráulico (R) <m>	0,083
Velocidad de ascenso (v_a) <m/s>	0,004
Pérdidas por fricción (hf) <m>	0,001
Gradiente (G) <s⁻¹>	3,557

Fuente: Autores

DISEÑO DE UN SEDIMENTADOR DE ALTA TASA

Volumen del sedimentador (ϑ)

$$\vartheta = \frac{QMD}{t} = < m^3 >$$

Donde, QMD es el caudal máximo diario en $< m^3/s >$ y t es el tiempo de retención en s.

Fijando un tiempo de retención de 15 min y reemplazando los valores en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\vartheta = \frac{0,00030 \text{ m}^3/s}{900 \text{ s}} = 0,276 \text{ m}^3$$

Carga Superficial (V_{cs})

$$V_{cs} = \frac{QMD}{At} = < m^3/m^2 * s >$$

Donde, QMD es el caudal máximo diario en $< m^3/s >$ y At corresponde al área transversal del floculador.

Por tanto al reemplazar los valores en la ecuación se obtiene:

$$V_{cs} = \frac{0,000307 \text{ m}^3/s}{0,086 \text{ m}^2} = 0,004 \text{ m}^3/m^2 * s$$

Que la carga superficial en el proceso de sedimentación es de $0,004 \text{ m}^3/m^2 * s$ equivalente a **$309,40 \text{ m}^3/m^2 * d$** .

Velocidad de las placas (Vp)

$$V_p = \frac{QMD}{At * \text{SEN } \theta} = < \text{m/s} >$$

Donde, QMD es el caudal máximo diario en m^3/s , At corresponde al área transversal del floculador y θ es el ángulo de inclinación del elemento de sedimentación de alta tasa.

Teniendo en cuenta que la inclinación de los paneles es de 60° y reemplazando los valores en la ecuación se obtiene,

$$V_{cs} = \frac{0,000307 \text{ m}^3/\text{s}}{0,086 \text{ m}^2 * \text{SEN } 60^\circ} = \mathbf{0,004 \text{ m/s}}$$

Altura Relativa de Sedimentación (Hr)

$$Hr = \frac{(Sc * V_p) * (V_{cs} * \text{SEN } \theta)}{V_{cs} * \text{COS } \theta} = < \text{m} >$$

Donde, Sc equivale a 1 para sedimentadores de alta tasa, V_p es la velocidad de las placas en m/s , V_{cs} es la carga superficial en $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ y θ es el ángulo de inclinación del elemento de sedimentación de alta tasa.

Reemplazando los valores en la ecuación, se obtiene:

$$Hr = \frac{\left(1,0 * 0,004 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) - (0,004 \text{ m}^3/\text{m}^2 * \text{s} * \text{SEN } 60^\circ)}{0,004 \text{ m}^3/\text{m}^2 * \text{s} * \text{COS } 60^\circ} = 0,577 \text{ m}$$

Altura relativa de transición (Hrt)

La altura relativa para la región de transición en tubos se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$Hrt = \frac{0,013 * V_p * d}{\nu} = < m >$$

Donde, V_p es la velocidad promedio del fluido en el momento de sedimentación de alta tasa, es decir, la velocidad de las placas en $< m/min >$, d corresponde a la separación entre placas en $< m >$ y ν es la viscosidad cinemática del fluido en $< m^2/min >$.

Reemplazando los valores en la ecuación, se tiene que:

$$Hrt = \frac{0,013 * 0,248 \frac{m}{min} * 0,025m}{0,00006 m^2/min} = \mathbf{1,344 m}$$

Altura del Sedimentador (Hs)

Cuando la altura relativa de transición (Hrt) del sedimentador de alta tasa es mayor a la altura relativa del sedimentador (Hr) se sugiere tomar como valor de altura del sedimentador un valor igual a 2Hr. Esto es:

$$Hs = 2 * 0,577 m = \mathbf{1,155 m}$$

Velocidad crítica de asentamiento (Vcr)

La velocidad crítica de asentamiento está dada por:

$$V_{cr} = \frac{Sc * V_p}{SEN \theta + L COS \theta} = < m/s >$$

Donde, S_c equivale a 1 para sedimentadores de alta tasa, V_p es la velocidad de las placas en m/s , L es la altura del sedimentador de alta tasa en el flujo laminar en m y θ es el ángulo de inclinación del elemento de sedimentación de alta tasa.

Reemplazando los valores en la ecuación, se obtiene:

$$V_{cr} = \frac{1 * 0,004 \text{ m/s}}{\text{SEN } 60^\circ + 1,15 \text{ m} * \text{COS } 60^\circ} = 0,003 \text{ m/s}$$

Pérdidas por Conducto (h_s)

$$h_s = 10,64 * \frac{(QMD)^{1,85} * H_s}{C^{1,85} * (2a)^{4,85}} = \text{m}$$

Donde, QMD es el caudal máximo diario en m^3/s , H_s es la altura del sedimentador en m , C es el coeficiente de rugosidad para PVC y a es la apotema en m . En la tabla 60 se muestran los resultados obtenidos para el cálculo del apotema.

Tabla 63. Cálculo de la apotema

Lado del Conducto (l_c) m	0,0254
Apotema (a) m	0,0220
Área del Conducto (A_c) m^2	0,0017
Área Total # de Conductos (A_{tc}) m^2	0,0670
Área transversal Sedimentador (A_t) m^2	0,0856

Fuente: Autores

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene,

$$h_s = 10,64 * \frac{\left(0,00037 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^{1,85} * 1,155 \text{ m}}{(150)^{1,85} * (2 * 0,02 \text{ m})^{4,85}} = 0,001 \text{ m}$$

Número de Reynolds (N_{RE})

Se recomienda verificar el N_{RE} para garantizar un flujo laminar en los sedimentadores de alta tasa. El N_{RE} se obtuvo a partir de la siguiente formula:

$$N_{RE} = \frac{Vp * d}{\nu} = <>$$

Donde, Vp es la velocidad de las placas en $<m/s>$, d corresponde a la separación entre placas en $<m>$ y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

$$N_{RE} = \frac{0,004 \text{ m/s} * 0,025 \text{ m}}{1 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = \mathbf{103,73}$$

El resultado obtenido indica que el flujo de agua dentro del sedimentador es laminar.

Tiempo de retención entre conductos (tp)

El tiempo de retención se calculó por la siguiente expresión:

$$tp = \frac{l}{Vp} = < s >$$

Donde, l es la longitud de cada conducto en $<m>$ y Vp es la velocidad de las placas en $<m/s>$.

$$tp = \frac{1 \text{ m}}{0,004 \text{ m/s}} = 241,84 \text{ s}$$

El tiempo de retención es de 241, 84 s equivalentes a 4,0 min.

Número de conductos (Nc)

$$Nc = \frac{Hs * \text{SEN } \theta + d}{d + e} = <>$$

Donde, H_s es la altura del sedimentador en <m>, θ es el ángulo de inclinación del elemento de sedimentación de alta tasa, d corresponde a la separación entre placas en <m> y e es el espesor en <m>.

$$N_c = \frac{1,155 \text{ m} * \text{SEN } 60^\circ + 0,025 \text{ m}}{0,025 \text{ m} + 0,001 \text{ m}} = 39,4 \text{ conductos}$$

Se instalaran **40 conductos** en el sedimentador de alta tasa.

La tabla que se muestra enseguida, resume los cálculos realizados anteriormente para el diseño del sedimentador de alta tasa.

Tabla 64. Diseño del sedimentador de alta tasa

Sedimentador de alta tasa	
Tiempo de retención (t) <min>	15,000
Longitud de cada conducto (l) <m>	1,000
Separación (d) <cm>	2,500
Separación (d) <m>	0,025
Espesor (e) <mm>	1,000
Factor de sedimentación (Sc) <>	1,000
Ángulo de inclinación de las placas(θ) <60°>	1,047
Volumen del Sedimentador (ϑ) <m ³ >	0,276
Diámetro del Sedimentador (ϕ_s) <in>	13,000
Diámetro del Sedimentador (ϕ_s) <m>	0,330
Carga Superficial (Vcs) <m ³ /m ² *s>	0,004
Carga Superficial (Vcs) <m ³ /m ² *d>	309,395
Velocidad Placas (Vp) <m/s>	0,004
Altura Relativa de Sedimentación (Hr) <m>	0,577
Altura Relativa de Transición (Hrt) <m>	1,344
Altura del sedimentador (Hs) <m>	1,155
Velocidad Crítica de asentamiento (Vcr) <m/s>	0,003
Pérdidas por Conducto (hs) <m>	0,001
Pérdidas totales (hs) <m>	0,058
Número de Reynolds (NRE) <>	103,373
Tiempo de retención entre conductos (tp) <s>	241,842
Tiempo de retención entre conductos (tp) <min>	4,031
# Conductos (Nc) <>	39,423
# Conductos (Nc) <>	40,000

Fuente: Autores

Diseño de la tolva de recolección de lodos

La sección de cono truncado para almacenamiento de lodos se diseñó teniendo en cuenta un volumen máximo diario de 26,494 m³ y un porcentaje de producción de lodos del 0,5 %.

Volumen de producción de lodos (ϑL)

La determinación de la cantidad de lodos generados en el proceso de tratamiento se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$\vartheta L = V * \% \text{ Producción lodos} = < m^3 >$$

Donde, V es el volumen máximo diario en $< m^3 >$.

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$\vartheta L = 26,495 \text{ m}^3 * 0,5 \% = 0,133 \text{ m}^3$$

Se obtiene que el volumen de lodos generados al día es de **0,133 m³**.

Volumen del cono truncado (ϑct)

El volumen del cono truncado se calculó a partir de la siguiente ecuación; teniendo en cuenta que el diámetro del floculador equivale a 13 in, el radio superior del cono obtendría un valor de 6,5 in y tomando como base un radio inferior de 6,0 in y una altura de 1,7 m, se tiene:

$$\vartheta ct = \left(\frac{1}{3} \pi Hct \right) * \left(Rct^2 + rct^2 + \sqrt{Rct^2 rct^2} \right) = < m^3 >$$

Donde, π : 3,141592, H_{ct} es la altura del cono truncado en <m>, R_{ct} es el radio superior del cono en <m>, r_{ct} es el radio inferior del cono en <m>.

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$\vartheta_{ct} = \left(\frac{1}{3} \pi 1,70 \text{ m} \right) * \left((0,1651)^2 + (0,154)^2 + \sqrt{(0,1651)^2 (0,154)^2} \right) = 0,134 \text{ m}^3$$

Se obtiene que el volumen del cono truncado para el almacenamiento de lodos es de **0,134 m³**.

La tabla que se muestra a continuación contiene un resumen del cálculo realizado para la determinación del volumen del cono, así como los datos fijados.

Tabla 65. Diseño del cono truncado para la recolección de lodos

Recolección de Lodos	
Volumen máximo diario (ϑ) <m ³ >	26,4946
Porcentaje de producción de lodos	0,5%
Volumen de producción de lodos (ϑ_L) <m ³ >	0,1325
Radio superior Cono truncado (R_{ct}) <in>	6,5000
Radio superior Cono truncado (R_{ct}) <m>	0,1651
Radio inferior Cono truncado (r_{ct}) <in>	6,0000
Radio inferior Cono truncado (r_{ct}) <m>	0,1524
Altura Cono truncado (H_{ct}) <m>	1,7000
Volumen Cono Truncado (ϑ_{ct}) <m ³ >	0,1347

Fuente: Autores

Diseño de un sistema de filtros rápidos

Área de los filtros

$$Af = \frac{QMD}{K} = < m^2 >$$

Donde, QMD es el caudal máximo diario en $< m^3/d >$ y K es la carga superficial en $< m^3/m^2*d >$.

Reemplazando los valores en la ecuación resulta un área para cada filtro de:

$$Af = \frac{26,495 \text{ m}^3/d}{120 \text{ m}^3/\text{m}^2 * d} = \mathbf{0,221 \text{ m}^2}$$

Ancho (B), Largo (L) y profundidad del filtro

La relación L/B se fijó teniendo en cuenta que los filtros tuvieran un diseño cuadrado. Por tanto se le dio un valor 1.

$$B = \frac{Af}{\text{Relación } \frac{L}{B}} = \frac{0,221 \text{ m}^2}{1} = 0,221 \text{ m}^2$$

Por tanto el valor de L es **0,221 m²**.

La profundidad del filtro está determinada por la sumatoria de los valores de la profundidad del medio, la profundidad de la grava, el borde libre, la cabeza de presión de agua y el fondo falso, los cuales fueron reemplazados en la siguiente ecuación.

$$Pf = 0,6 \text{ m} + 0,3 \text{ m} + 0,03 \text{ m} + 0,03 \text{ m} + 0,076 = \mathbf{1,036 \text{ m}}$$

Pérdida de carga a través de un filtro limpio

La pérdida de carga por fricción a través de lechos estratificados se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{h}{L} = 0,178 * \frac{v^2}{g e^4} * \frac{\alpha}{\beta} \sum C_D \frac{P_i}{d_i} = < m >$$

Donde, h es la pérdida de carga a través del lecho en $<m>$, L es la profundidad del lecho en $<m>$, v es la velocidad de filtración en $<m/s>$, g es la aceleración de la gravedad en $<m/s^2>$, α es el factor de forma de área superficial, β es el factor de forma de volumen para arena redondeada (ver tabla 66), d_i equivale al tamaño promedio geométrico de las aberturas de los dos tamices adyacentes, C_D es el coeficiente de arrastre para los granos de tamaño promedio d_i y P_i es la fracción en peso de las partículas de tamaño d_i .

Tabla 66. Valores aproximados de factores de forma para arena

Tipo de arena	β	α/β	ψ
Angular	0,64	6,9	0,81
Afilada	0,77	6,2	0,85
Erosionada	0,86	5,7	0,89
Redondeada	0,91	5,5	0,91
Esférica	0,52	6,0	1,00

Fuente: Romero, 1999.

Coeficiente de arrastre (C_D)

$$C_D = \frac{24}{N_{RE}} + \frac{3}{\sqrt{N_{RE}}} + 0,34 = <>$$

Donde, C_D es el coeficiente de arrastre y N_{RE} es el número de Reynolds.

Número de Reynolds (N_{RE})

$$N_{RE} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu} = \langle \rangle$$

Donde, v es la velocidad en $\langle m/s \rangle$, d es el diámetro característico de los granos en $\langle m \rangle$ y ν es la viscosidad cinemática en $\langle m^2/s \rangle$.

En la siguiente tabla se observan los resultados de la determinación de N_{RE} , el CD , Pi/di para cada número de tamiz seleccionado teniendo en cuenta las ecuaciones mencionadas anteriormente. Con los valores de la sumatoria de la columna 7 de la tabla siguiente fue posible determinar la pérdida de carga inicial del filtro limpio.

Tabla 67. Determinación del Número de Reynolds, Coeficiente de arrastre y relación de peso de las partículas con respecto al diámetro

Número de tamiz	Tamaño promedio (di) $\langle cm \rangle$	Arena retenida (Pi) $\langle \% \rangle$	Número de Reynolds	CD	Pi/di	CD *Pi/di
14 - 20	0,100	0,92	0,886	30,6	9,2	281,7
20 - 28	0,070	4,71	0,620	42,9	67,3	2883,7
28 - 32	0,054	14,67	0,478	54,9	271,7	14901,9
32 - 35	0,046	17,90	0,407	63,9	389,1	24881,8
35 - 42	0,038	17,50	0,337	76,8	460,5	35374,7
42 - 48	0,032	19,80	0,283	90,6	618,8	56087,8
48 - 60	0,027	15,40	0,239	106,8	570,4	60930,7
60 - 65	0,023	7,10	0,204	124,8	308,7	38522,5
65 - 100	0,018	2,00	0,159	158,4	111,1	17597,9
					2806,74	251462,7

El espesor de cada una de las capas de arena de cada número de tamiz es de 6 mm y una capa final de antracita de 6mm

Fuente: Autores

Entonces, se tiene que,

$$h = 0,178 * \frac{\left(0,001 \frac{m}{s}\right)^2}{9,81 \frac{m}{s^2} (0,5)^4} * 5,5 * 251462,7 * 0,6 m = 0,465 m$$

La pérdida de carga inicial es de **0,465 m**.

Hidráulica del sistema de lavado

Velocidad de arrastre

La velocidad del agua de lavado debe ser la suficiente para arrastrar el material suspendido removido por el filtro, pero no debe ser tan alta como para provocar el arrastre del medio filtrante.

Para arena densidades relativas del orden de 2,65 la velocidad de arrastre está determinada por:

$$V_t = 10 D_{60} = < m/min >$$

Donde V_t es la velocidad de arrastre en m/min y D_{60} es el producto del tamaño efectivo por el coeficiente de uniformidad.

Reemplazando los datos en la ecuación, teniendo en cuenta que el tamaño efectivo es 0,55 mm y el coeficiente de uniformidad de 1,6 se tiene que:

$$V_t = 10 * 0,55mm * 1,6 = \mathbf{8,8 m/min}$$

Velocidad de lavado para fluidización del medio

$$V_b \geq V_t e^{4,5} = < m/min >$$

Donde V_b es la velocidad ascensional en m/min y e es la porosidad del medio.

Reemplazando los datos en la ecuación, teniendo en cuenta que la porosidad del medio es de 0,5, se tiene que:

$$V_b = 8,8 \text{ m/min} * 0,5^{4,5} = 0,389 \text{ m/min}$$

La velocidad de lavado debe ser igual al 10% de la velocidad de arrastre, entonces:

$$V_b = 8,8 \text{ m/min} * 10\% = \mathbf{0,880 \text{ m/min}}$$

La pérdida de carga durante el lavado es expresada de la siguiente manera:

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = < m >$$

Donde, H es la pérdida total de carga durante lavado en <m>, h₁ es la pérdida de carga a través del lecho expandido en <m>, h₂ es la pérdida de carga a través del lecho de la grava en <m>, h₃ es la pérdida de carga a través del sistema de drenaje y h₄ es la pérdida de carga en la tubería.

Pérdida de carga a través del lecho expandido (h₁)

$$h_1 = L (1 - e) * (S_s - 1) = < m >$$

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$h_1 = 0,6 \text{ m} (1 - 0,5) * (2,65 - 1) = \mathbf{0,495m}$$

Pérdida de carga a través del lecho de la grava (h₂)

$$h_2 = \frac{V_b L}{3} = < m >$$

Donde, V_b es la velocidad de lavado en $\langle m/min \rangle$ y L es la altura del lecho de grava en $\langle m \rangle$.

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$h_2 = \frac{0,88 \text{ m/min} * 0,3 \text{ m}}{3} = \mathbf{0,088 \text{ m}}$$

Pérdida de carga a través del sistema de drenaje (h_3)

$$h_3 = \frac{1}{2g} \left[\frac{V_b}{\alpha \beta} \right]^2 = \langle m \rangle$$

Donde, V_b es la velocidad de lavado en $\langle m/s \rangle$, α es el coeficiente del orificio equivalente a 0,6 y β es la relación entre el área total de orificios y el área del lecho filtrante equivalente a 0,6%.

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$h_3 = \frac{1}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} \left[\frac{0,014 \text{ m/s}}{0,6 * 0,6\%} \right]^2 = \mathbf{0,846 \text{ m}}$$

Pérdida de carga en la tubería (h_4)

$$h_4 = f \frac{L}{D} \frac{1}{2g} \left[\frac{4 A V_b}{\pi D^2} \right]^2 = \langle m \rangle$$

Donde, f es el factor de fricción, L es la longitud equivalente de la tubería de lavado en $\langle m \rangle$, D es el diámetro de la tubería en $\langle m \rangle$, A es el área del lecho filtrante en $\langle m^2 \rangle$, V_b es la velocidad de lavado en $\langle m/s \rangle$.

Reemplazando los valores en la ecuación,

$$h_4 = 0,02 \frac{5 \text{ m}}{0,076 \text{ m}} \frac{1}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} \left[\frac{4 * 0,221 \text{ m}^2 * 0,014 \text{ m/s}}{\pi (0,076)^2} \right]^2 = \mathbf{0,033 \text{ m}}$$

Una vez obtenidas las perdidas resultantes de cada proceso del lavado del filtro se obtuvo un valor de **1,463 m** de pérdida de carga total durante el lavado.

Diseño de la canaleta de lavado

Las dimensiones de las canaletas de lavado se determinaron teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$Q = 1,38 b h^{1,5} = < m^3/s >$$

Donde, Q es el caudal máximo de lavado en <m³/s>, b es el ancho de la canaleta y h es la profundidad máxima del agua en la canaleta.

El caudal máximo de lavado se determinó teniendo en cuenta el volumen máximo de lavado y el tiempo del lavado del filtro; donde el volumen corresponde a la cantidad de m³ de agua tratada al día por el porcentaje de pérdidas en cada lavado equivalente al 2% y el tiempo del lavado del filtro de ocho (8) minutos.

$$Q = \frac{V * \% \text{ pérdidas}}{t} = \frac{26,49 \text{ m}^3 * 2\%}{480 \text{ s}} = \mathbf{0,001 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Fijando una profundidad de 0,12 m en la canaleta se determinó el ancho de la misma, así:

$$b = \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{s}}{1,38 * (0,12)^{1,5}} = \mathbf{0,018 \text{ m}}$$

Se determina teniendo en cuenta el resultado obtenido del ancho de la canaleta un valor de b igual a la altura de la misma.

En las siguientes tablas se observa un resumen de los cálculos realizados anteriormente, así como los datos fijados necesarios para la operación de los filtros.

Tabla 68. Características de los Filtros rápidos

Características del Filtro	
Medio	Arena
Duración carrera (Tc) <horas>	24
Profundidad del medio (Lm) <m>	0,6
Profundidad grava (Lg) <m>	0,3
Borde libre (Bl) <m>	0,03
Cabeza de presión agua <m>	0,03
Fondo falso (ff) <m>	0,0762
Tamaño efectivo (Te) <mm>	0,55
Coeficiente de uniformidad <>	1,6
Factor α/β (arena redondeada) <>	5,5
Porosidad (e) <>	0,5
Viscosidad cinemática (v) <m ² /s>	1,57E-06

Fuente: Autores

Tabla 69. Cálculos del diseño de los Filtros rápidos

Filtros rápidos	
Caudal a tratar (QMD) <m ³ /d>	26,495
Carga Superficial <m ³ /m ² *d>	120,000
Número de filtros <>	2,000
Área del filtro (Af) <m ² >	0,221
Relación L/B	1,000
Ancho (B) <m>	0,470
Largo (L) <m>	0,470
Profundidad del filtro (Pf) <m>	1,0362
Pérdida de carga inicial (h) <m>	0,465
Velocidad de arrastre (Vt) <m/min>	8,800
Velocidad de arrastre (Vt) <mm/seg>	146,667
Velocidad ascensional de lavado (Vb) <m/min>	0,389
Velocidad apropiada de lavado (Vb) <m/min>	0,880

Fuente: Autores

Tabla 70. Datos requeridos para la hidráulica de lavado de los filtros

Datos para la hidráulica de lavado	
Densidad Relativa ρ	2,65
Coeficiente del orificio (α)	0,6
Relación área total de orificios y del lecho filtrante (β) %	0,60%
Factor de fricción (f)	0,02
Longitud equivalente de la tubería (L_e) m	5
Diámetro de la tubería lavado (D_1) in	3
Diámetro de la tubería lavado (D_1) m	0,0762
Agua de lavado %	2%
Tiempo de lavado de filtro (TL) min	8
Tiempo de lavado de filtro (TL) s	480

Fuente: Autores

Tabla 71. Pérdidas totales en el lavado de los filtros

Hidráulica de lavado	
Pérdida de carga a través del lecho expandido (h_1) m	0,4950
Pérdida de carga a través del lecho de grava (h_2) m	0,0880
Pérdida de carga a través del sistema de drenaje (h_3) m	0,8460
Pérdida de carga en la tubería, válvulas (h_4) m	0,0337
Pérdida de carga total durante el lavado (H) m	1,4627

Fuente: Autores

Tabla 72. Diseño de la canaleta de lavado

Canaleta de lavado	
Volumen lavado (VL) m ³	0,53
Caudal máximo de lavado (QL) m ³ /s	0,00110
Profundidad máxima del agua en la canaleta (h) m	0,12500
Ancho de la canaleta (b) m	0,01810
Profundidad máxima del agua en la canaleta seleccionada (h) m	0,125
Ancho de la canaleta seleccionada (b) m	0,125

Fuente: Autores

Determinación del caudal de desinfección

El caudal de NaClO requerido en el proceso de desinfección, se estableció a partir de la dosis óptima de NACIO obtenida en las gráficas de demanda de cloro y el caudal de agua a tratar, así como el tiempo de retención del tanque lleno.

$$Dm = \frac{QD * [D]}{QMD} = \frac{0,071 * 929,810}{26,495} = 2,507 \text{ mg/L}$$

Donde, Dm es la dosis de mezcla en mg/L , QD es el caudal de dosificación en m^3/d , $[D]$ es la concentración de dosificación en mg/L , QMD es el caudal máximo diario en m^3/d .

Tabla 73. Caudal de dosificación de NaClO

Caudal de dosificación de NaClO	
Caudal máximo diario (QMD) m^3/d	26,495
Volumen del tanque de desinfección (θ) m^3	0,500
Duración del tanque lleno (t) días	7,000
Concentración de cloro residual ($[R]$) mg/L	2,500
Caudal de dosificación (QD) m^3/d	0,071
Caudal de dosificación (QD) L/h	2,976
Concentración de dosificación ($[D]$) mg/L	929,810
Dosis de mezcla (Dm) mg/L	2,507

Fuente: Autores